

島堤の滑動安定性に及ぼす長周期波の影響について

清水 琢三*・鵜飼 亮行*・片山 裕之*
金山 進*・川俣 奨*・近藤 浩右**

1. ま え が き

島堤の設計に際しては、いわゆる蛇行災害の原因となる反射波と両端からの回折波による堤体沿いの波高分布は考慮されるものの、周期1～2分程度の長周期波が堤体の安定性に及ぼす影響については、現在のところメカニズムが十分理解されていないこともあって、考慮されていない。しかしながら、入射波には碎波帯外であっても少なくとも波浪の非線形干渉によって生じる波群拘束長周期波が必ず含まれており、入射波高が大きくなると急激に増大するため、長周期水面変動は設計水位の変動として堤体の安定性に大きな影響を及ぼすものと考えられる(例えば、関本ら, 1990)。

通常、ケーソン堤の設計波高としては最高波高が用いられるが、入射波が最高波高を生じる場合には波群に拘束された長周期水面変動は大抵 set-down が生じて水位が低下しており、設計潮位よりも水位が低いので浮力が低減し、滑動安定性は設計で見込んだ安全率よりも高いことが期待される。しかしながら、島堤周りでは、波浪成分も長周期成分も両端で位相が拘束されるため、波群の拘束を解かれ、自由波が発生する。そのため、入射波群の波浪と長周期波の位相関係がずれ、長周期波の水位が高いときに高波浪が作用することも考えられる。また、堤体の前面では重複波が形成されると、波群拘束波を引き起こす外力である radiation stress が進行波の場合と異なるため、set-down 波の特性が変化する。さらには、島堤の沖で碎波する場合には、碎波に伴い自由波が発生し、この自由波は堤体周りで通常波浪とはランダムな位相で重なり合う可能性がある。したがって、堤体の滑動安定性にとっては、最高波高が作用する場合だけでなく、長周期波の水位が上昇しているときに大きな波群が重なる場合も重要になると考えられる。

そこで本研究では、現地で島堤周辺の水位変動を連続観測するとともに、ブシネス方程式を用いた数値シミュレーションを実施して、島堤周りの波浪と長周期波の同時水位変動を調べ、堤体の滑動安定性に及ぼす長周期

波の影響について考察した。

2. 現地観測データに基づく検討

2.1 現地観測の概要

建設途上の常陸那珂港第4埠頭東護岸(水深17.5m)が長さ375mの島堤状態にあった1994年10月15日～11月2日の19日間、図-1に示す入射波観測地点(P0)と堤体周りの6地点の合計7地点においてサンプリング間隔1sで水圧センサーによる水位の連続観測を行った。P4を除く地点はケーブルにより同期した。観測データは1時間毎に区切り、数値フィルターにより周期30s以下の波浪成分とそれ以上の長周期波成分に分離し、通常波浪と長周期波の同時水位変動について考察した。なお、P0とP1には超音波波高計も設置し、水圧波形から水位波形の変換に役立てた。

2.2 入射波浪特性

本検討では、代表例として、①ケース1：風波が卓越するケースと②ケース2：うねりが卓越するケースの2ケースについて詳細に検討した。入射波浪の諸元は表-1に示す通りである。波向は2ケースともほぼE方向で防波堤に対して直角入射である。また、堤長 l の通常波浪の波長 L に対する比は $l/L=3.2\sim 5.3$ 、長周期波の波長 L_L に対する比は $l/L_L=0.4$ である。

入射波浪に含まれる長周期波が入射波の通常波浪成分の波群に拘束された波であるかを判断するため、波浪成分から Sand (1982) の方法により単一方向波を仮定して波群拘束波をシミュレートし、実測の長周期波と比較した。その結果を図-2に示す。ケース1は長周期波の実測

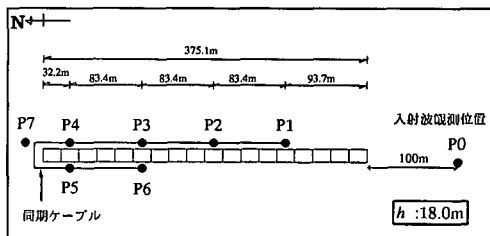


図-1 調査地点位置図

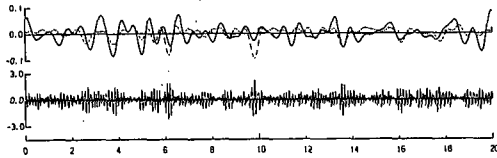
* 正会員 工修 五洋建設(株) 技術研究所

** 正会員 工修 五洋建設(株) 常陸那珂港工事事務所

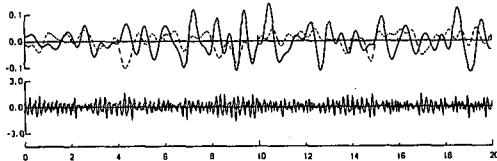
表-1 検討波浪条件 (P0地点)

ケース	通常波浪成分					長周期波成分			
	$H_{1/3}$	$T_{1/3}$	H_{max}	T_{max}	主波向	$H_{L1/3}$	$T_{L1/3}$	H_{Lmax}	T_{Lmax}
1 (10/21/23時)	2.29 m	7.5 s	4.07 m	6.0 s	87°	0.22 m	70.6 s	0.30 m	59.0 s
2 (10/27/19時)	2.05 m	10.5 s	3.62 m	11.0 s	95°	0.34 m	68.5 s	0.50 m	68.0 s

主波向: N より時計回りの角度



(a) ケース 1 (10月21日 23時 0分~20分)



(b) ケース 2 (10月27日 19時 40分~60分)

図-2 波群拘束波の計算値と実測長周期波の比較

波形とシミュレート波形が概ね一致しており、波群拘束波としての存在を示しているものと考えられるが、ケース 2 は波群の大きいところで set-down する傾向は一致しているものの、実測の長周期波は振幅が 2 倍以上大きく、入射波浪にすでに自由波としての長周期波が含まれていたものと判断される。

ケース 1 は風波が卓越し、静穏な状況から急激に波が発達したときのピークであり、ケース 2 はうねりにより徐々に波が発達したときのピーク付近のケースである。関本ら (1991) も大洗港での観測で同様の結果を報告しており、波の発達期にのみ波群拘束波の特徴を示し、高波浪の減衰期や波浪の発達が穏やかなときはそれ以前のサーフビートのエネルギーがトラップされた可能性があることを指摘している。また、加藤ら (1991) は、砕波帯外の長周期波を波群拘束波と砕波点の移動による冲向きの長周期波の重合と捉えて現地観測結果の説明を試み

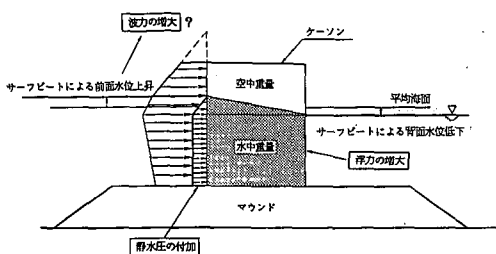


図-3 滑動安定性に及ぼす長周期波の影響の模式図

ている。本検討では、ケース 1 を波群拘束波としての性質を有するケース、ケース 2 を波群拘束波に自由長波が重合したケースと考えて、以下の考察を行った。

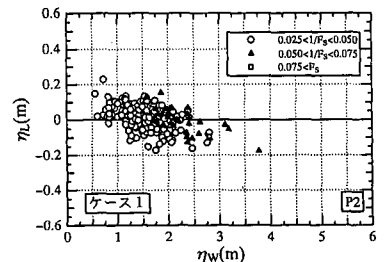
2.3 島堤周辺の水面変動特性ならびに滑動安定性

ここでは、島堤のほぼ中央の P2 地点における観測結果に基づき波浪と長周期波の同時水位変動特性を把握するとともに、ケーソン堤の滑動安定性について考察する。

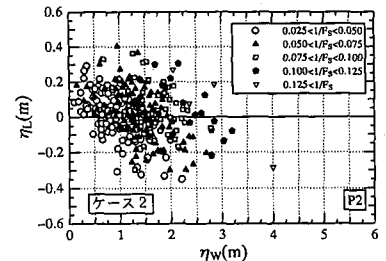
図-3 は、ケーソン堤の滑動安定性に及ぼす長周期波の影響を模式的に示したものである。長周期波による水位上昇は浮力の増大により滑動抵抗力を小さくすると同時に波力の増大をもたらす可能性がある。波群拘束長周期波の周期は通常 60~90 秒であるから、波力を考えるときには長周期波による水位変動は静水圧的に作用すると考えられるので、長周期波の水位を静水位と考えて合田式を適用して波力を算出した。滑動安全率を算定する際のケーソン堤の諸元は、現地観測地点のケーソンを模擬して幅 16.2 m、高さ 17.5 m、マウンド厚は 3 m としたが、背面盛土の効果などは考慮していない。

図-4 は、波浪成分をゼロアップクロス法で定義した 1 波毎のピーク水位 η_w とそのときの長周期波の水位 η_L の関係を示している。図中には、滑動安全率をパラメータとしてシンボル分けされている。ケース 1 は、入射長周期波が波群拘束波としての性質を有しているため、堤体沿いでも波高が大きいときは長周期水位が下がる傾向が明瞭にみられる。これに対してケース 2 は、自由長波成分が入射波に含まれているため、高波浪時には長周期水位が低下する傾向はみられるものの、ケース 1 に比べればばらつきが大きく、長周期波が様々な位相関係で波群と重合していることを示唆する結果となっている。

図-5 は、各ケースの滑動安全率が最も小さかった時刻を含

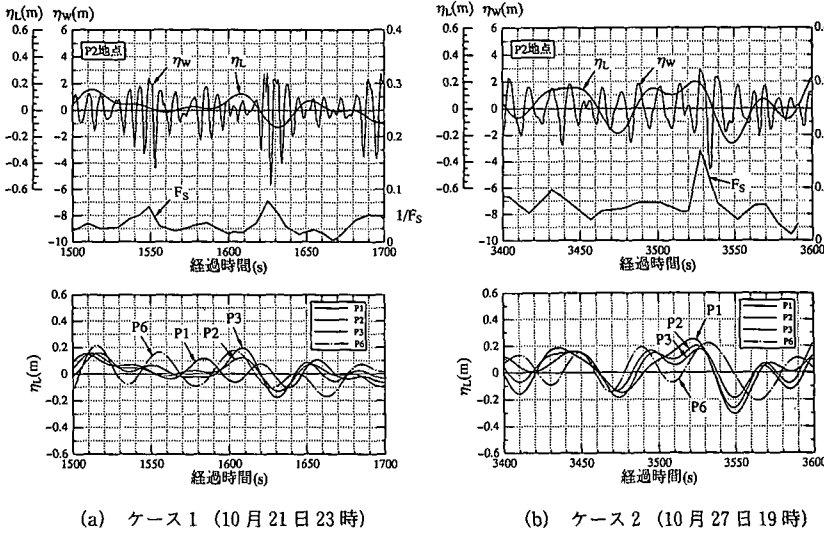


(a) ケース 1 (10月21日 23時)



(b) ケース 2 (10月27日 19時)

図-4 短周期波の峰高と長周期波の水位の関係 (P2 地点)



図一5 滑動安全率最小時の水位変動

本検討では、ケース1を検証ケースとして、P0で観測された水位変動時系列を入力波形として島堤周りの波浪および長周期波の水位変動を計算した。ただし、単一方向不規則波として取り扱っており、波向は堤体直角方向である。図一6は、島堤前面の波浪および長周期波の波高分布の計算値と実測値の比較を示したものである。波浪は端部で回折波による波高増大が、長周期波は中央で波高がピークになる様子が計算されており、実測値との対応も概ね

め、P2地点の波浪と長周期波、安全率の経時変化ならびに堤体前面のP1とP3およびP3の直背面のP6地点における長周期波の同時水位変化を示したものである。

ケース1では、波の片振幅(+)としては5番目に大きな波群の来襲時に(経過時間1630s付近)長周期波の水位が低下し、安全率が最も小さくなっているが、波高が最大の時ではない。また、比較的大きな波群の来襲している1550s付近では、波群に対応したset-downは生じておらず、入射波としては波群に拘束されていても、堤体周りでは波群拘束を受けない散乱波によって波浪と長周期波の位相がずれることを示している。また、前面のP1~P3はほぼ同位相であるが、背面のP6は前面と位相が逆転する傾向がみられる。

ケース2は、もともと入射波に自由波が含まれているためか、長周期波と波の位相はランダムである。波の片振幅(+)は5番目であるが、長周期波の水位が上昇しているときに安全率が最小となっている。

以上のように、長周期波が波群拘束波の場合でも、自由波が重なっている場合でも、島堤の滑動安定性は設計で考えているように最高波が来襲したときが必ずしも厳しいわけではなく、長周期波の水位が高いときに比較的大きな波が重なった場合に最も危険になる場合が起こることが現地データから明らかになった。

3. 数値シミュレーションによる検討

3.1 現地再現性の検討

ブシネスク方程式に基づく方法を用いて、島堤周りの水位変動を長周期波も含めて時系列的に解析した。計算方法は、金山ら(1994)と基本的には同じであるが、側方透過境界の工夫がなされている。

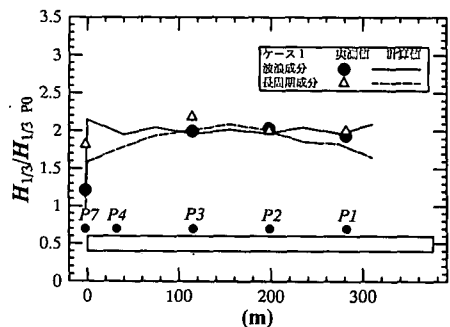
良好である。

3.2 島堤の滑動安定性の検討

図一7に示す水深20mの様な水深領域に、長さ850mの島堤を設置した場合をモデルケースとして、島堤周辺の波群拘束長周期波ならびに自由長波の挙動を解析した。

入射波は、有義波高4m、有義波周期15sとし、波群を強調するためWallops型スペクトル($m=20$)で先鋭なスペクトル形状を表して波浪成分の時系列波形を作成した。さらにSand(1982)の方法により波群拘束長周期波をシミュレートして通常波浪成分と重ね合わせることで波群拘束長周期波を含む不規則波の時系列を30分間作成した。入射長周期波の有義波は0.83m、87.7s、最高波は1.82m、141.6sであり、島堤の堤長はそれぞれの波長の0.69倍、0.43倍である。計算は、①ブシネスク方程式を用いた非線形計算と、②非線形項を考慮しない線形計算の2ケースを実施した。

図一8は、堤体前背面の最高波の波高分布を比較した



図一6 波浪および長周期波の実測値と計算値の比較

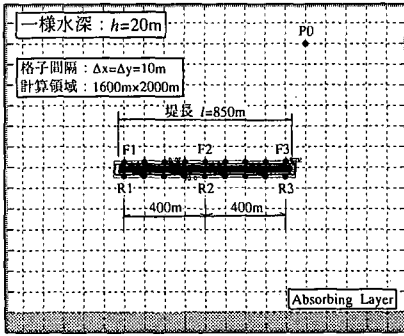


図-7 モデル計算領域

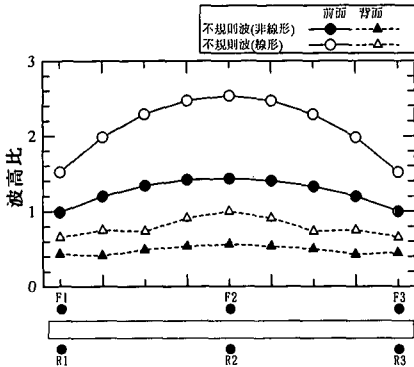


図-8 島堤周辺の波高分布の計算結果

結果であるが、前・背面ともに非線形項を考慮した計算の方が波高が小さくなる結果が得られた。

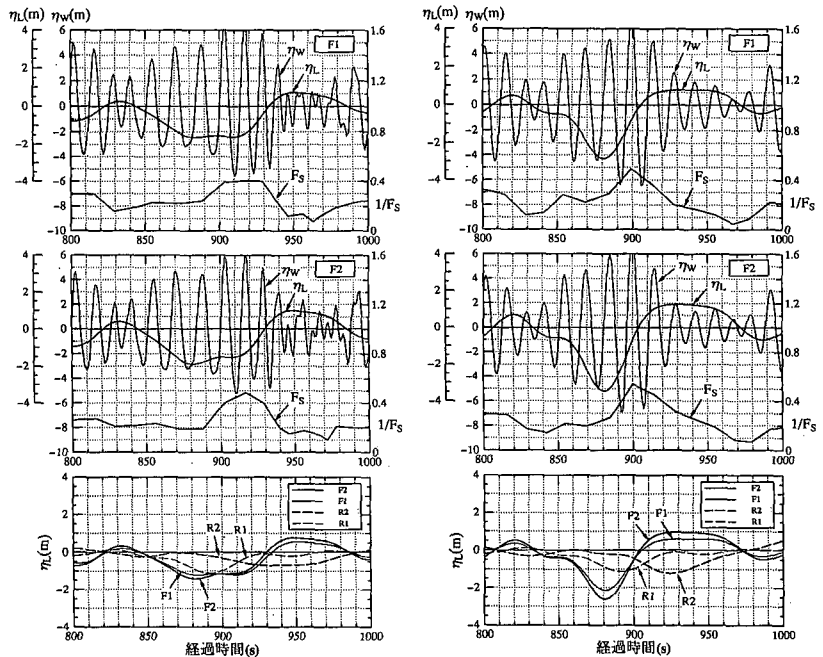
非線形性を考慮しない場合には、堤体から 800 m 沖の入射境界では波群に拘束された波を入射させているが、計算領域内では各周波数成分が単独に伝播するため、通常波浪成分の島堤周りの波高分布と同様、各周波数毎の入射波と反射波ならびに回折波による波高分布が重なった場が形成される。

これに対して、非線形干渉を考慮した場合には、入射波の通常波浪成分の波群に拘束された長周期波が堤体に入射するため、堤体周りで自由波が発生するものの、両端では入射波の波群に拘束される成分が卓越すると考えられること、また堤体前面では通常波浪成分の入射波と反射波が重

する拘束波が形成されるが、堤体壁面すなわち重複波の腹の位置で平均水位が上昇するように radiation stress が作用するため、進行波の波群拘束波よりも振幅が小さくなることが予想されることなどが、非線形性を考慮した場合に波高が小さくなった原因ではないかと推定される。

一方、Kioka (1992) も島堤周辺の 2 次の非線形干渉による長周期波の波高分布について検討しているが、その結果によれば堤体周りでの長周期水位変動は入射波群に含まれる拘束波の堤体周りでの回折現象と捉えることができ、線形の回折理論でも解析できることを示しており、本研究のブシネスク方程式による数値計算結果とは異なる。上述したような堤体前面での重複波形成による radiation stress の変化までは考慮されていないことが原因ではないかと推定される。

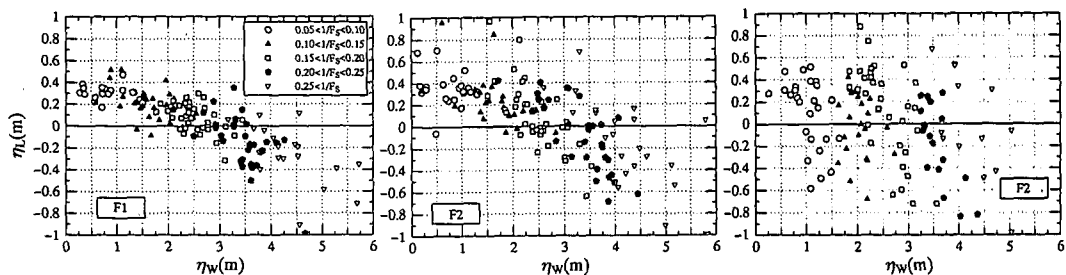
図-9 は、最高波を含む波群が来襲したときの堤体前面端部の F1 と中央の F2 の波浪と長周期波による水位変動と滑動安全率の経時変化、ならびに前背面の長周期水面変動の同時刻変化を示している。いずれのケースも堤体前面の長周期波は直角入射するためほぼ同位相で変動しているが、入射波群との関係を見ると、非線形性を考慮した場合の方が自由波の発生により多少の位相差は生じるものの、長周期波との位相差が小さい。これに対して、線形計算の場合には、長周期波の方がやや早く堤体に到達するため、すでに波群と長周期波に位相差がつ



(a) 非線形性を考慮した結果

(b) 線形計算の結果

図-9 最大波群来襲時の島堤周辺の水位変動の計算結果



(a) 非線形性を考慮した結果(端部: F1地点) (b) 非線形性を考慮した結果(中央: F2地点) (c) 線形計算の結果(中央: F2地点)

図-10 短周期波の峰高と長周期波の水位の関係 (P2地点)

いている。そのため、波群中の最高波が生じるときには、長周期波の水位がすでにかなり上昇している。また、前・背面水位差をみると、堤体の端部ではさほど位相差はつかないが、堤体中央では逆位相の関係になる場合があるので堤体の安定性を考える上では、背面水位も重要である。

最後に、図-10は短周期波の1波毎の最高水位 η_w とそのときの長周期波の水位 η_L の関係を示している。(a)の端部のF1では、波高が大きいたまには長周期波の水位が低下する関係が明瞭にみられ、端部では入射波群中の拘束波が卓越していることを示している。(b)の中央でも端部と同様の傾向がみられるものの、散乱波の影響が大きくなってばらつく傾向にある。また、(c)の線形計算の場合は、波浪と長周期波の位相はほぼランダムになることを示している。このような傾向は、図-5に示したように、入射波に自由長波を含む場合の方がばらつきが大きかったという実測値の傾向とも一致する。

以上の検討結果を総合的に判断すると、島堤周辺では長周期波が拘束を解かれるため、波浪が大きいたまに長周期波の水位が低下するという関係が崩れ、長周期水位が高いときに高波浪が作用する可能性があることがわかった。このような状況は、波群拘束長周期波が堤体に作用する場合は堤体端部より堤体中央で生じる可能性があり、また砕波などにより島堤の沖で自由波が発生した場合にはさらに起こりやすくなるものと推定される。

4. あとがき

本研究では、現地観測と数値シミュレーションの結果に基づき、堤体周りでの波浪と長周期波の同時水位変化について検討するとともに、堤体滑動安定性に及ぼす長周期波の影響について考察した。田中ら(1992)によって報告されているT9119号による若北火力発電所西防波堤中央部の滑動を除けば、防波堤の中央が被災した事例はこれまで報告されていないが、その原因は本研究の成果から、防波堤沖合での砕波による自由長周期波の発

生、波と長周期波の位相のずれ、防波堤延長が長周期波の波長にほぼ等しく、中央部で長周期水面変動が大きくなること等で特徴づけられ、長周期波の水位が設計潮位よりも高い状態で設計波クラスの波が作用した可能性を定性的には説明できる。しかしながら、今のところ波群拘束長周期波ですら波の多方向性などを考えると定量的評価は難しく、設計に反映させることは困難である。ましてや自由波が入射波に含まれる場合はなおさらである。したがって、長周期波と波の位相関係については、確率的な取り扱いをせざるを得ないのではないかとと思われる。

最後に現地観測場所を提供して下さいた東京電力株式会社常陸那珂火力建設所ならびに電源開発株式会社常陸那珂火力建設所をはじめとする関係各位には、深甚なる謝意を表する次第である。また、本論文をまとめるに当たり、関本恒浩氏(五洋建設(株)技術研究所)との議論が大変有益であった。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 加藤一正・中村聡志・池田直太(1991): 現地データによる長周期波の発生理論の検証, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 86-90.
- 金山 進・清水琢三・磯部雅彦(1994): プシネスク方程式を用いたサーフビート・水位上昇の平面2次元計算, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 61-65.
- 関本恒浩・近藤浩右・藤谷昌弘・今井澄雄・黒田輝夫(1990): 波群特性とサーフビートを考慮した防波堤堤頭部の設計波力について, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 624-628.
- 関本恒浩・清水琢三・鶴飼亮行・坂野雅人・近藤浩右(1991): 非砕波領域におけるサーフビートの現地観測, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 91-95.
- 田中征夫・清辺 哲・岡部成光(1992): 若北地点9119号台風災害の原因究明と復旧対策, 電力土木, No. 242, pp. 81-89.
- Kioka, W. (1992): Diffraction of second-order long-period waves by discontinuous offshore breakwaters, Coastal Eng. in Japan, Vol. 35, No. 2, pp. 147-165.
- Sand, S. E. (1982): Long waves in directional sea, Coastal Eng., Vol. 6, pp. 195-208.