

沿岸域地形急変部における長周期うねり性波浪の集中と対策

Mechanisms and Countermeasures for Local Amplification of Long Period Waves due to Alongshore Change in Nearshore Bathymetry

深瀬祐太郎¹・佐藤慎司²・田島芳満³・Ranashinghe Suminda⁴

Yuutaro FUKASE, Shinji SATO, Yoshimitsu TAJIMA and Ranashinghe SUMINDA

Laboratory experiments were conducted for the concentration of long period waves due to sudden alongshore change in nearshore bathymetry. Waves and currents were measured around a boundary between mild and steep sloping beds. Alongshore variation in wave run-up showed significant peaks near the boundary, which were developed by the interaction of waves with nearshore currents and the excitation of long wave components by breaking group waves. Introduction of shore protection structures on the mild slope side was found to be effective in decreasing run-up heights on the steep slope side.

1. はじめに

2008年2月24日に富山湾や佐渡島で発生した高波災害は「寄り回り波災害」とも呼ばれ、被災状況に時間差と局地性をもつ予測・対策の難しい災害であった。このような長周期うねり性波浪による災害は、2006年栗生海岸、2009年西湘海岸などでも発生しており、波浪の発達・変形機構などについて検討が進められている（例えば、中村ら、2008；間瀬ら、2008；田島ら、2008）。深瀬ら（2009）は下新川海岸の田中観測所において得られた波浪データを分析することによって、寄り回り波は長距離をうねりとして伝播することで周波数特性が鋭い長周期波浪に発達するとともに、非線形干渉により波群スケールの長周期変動成分が卓越することを明らかにした。また、うねり性波浪の来襲とともに沿岸の広い領域において強い海浜流が発生していたこと、海底地形が複雑な富山湾などの沿岸域では、屈折による波の集中に加えて波と流れの干渉による局所的な波高増幅機構も考慮する必要があることを示している。このような波浪増幅機構は、海底勾配が急変する領域において特に顕著となること、田島ら（2009）による実験において明らかにされている。

本研究では、海底地形が複雑に急変する地域を対象として、うねり性波浪の減災対策を検討することを目的とする。その上では、波浪の長周期変動成分に加えて海浜

流の抑制も大きな意義を持つと考えられる。したがって、波浪の屈折・碎波変形に加えて、長周期変動成分の重合や海浜流の発達も念頭において、これらの抑制策も含めて、波浪の集中機構と流れの発達に関する基礎実験を実施する。さらに、実験との整合性を十分に検討した数値モデル（Boussinesqモデル）を用いて地形急変部周辺の波浪変形計算を行い、減災対策として検討した構造物配置の有効性を検証する。

2. 地形急変部周辺の波と流れに関する平面水槽実験

(1) 実験方法

実験は、多方向造波装置を装備した長さ6.5m、幅11m、深さ0.3mの平面水槽において行った。水槽に固定された斜面は図-1のように基本的に沖側の1/10勾配斜面に岸側の1/20勾配斜面が接続する形になっているが、アタッチメントの設置により勾配1/40の緩斜領域を作り出し、地形急変部を表現した。側方には導波板による完全反射境界を設置することで鏡像原理によって尾根、谷の連続した海底谷地形を模擬している。なお、一様水深部の水深

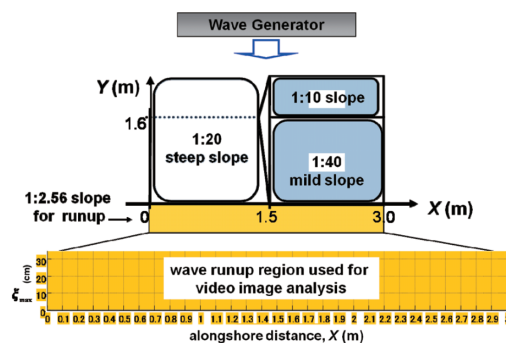


図-1 地形急変部と漕上斜面

- | | | |
|---|------------|--------------------------------|
| 1 | 修士(工) | 東日本旅客鉄道株式会社 |
| 2 | フェロー 工博 | 東京大学大学院 教授 工学系研究科
社会基盤学専攻 |
| 3 | 正会員 Ph. D. | 東京大学大学院 准教授 工学系研究科
社会基盤学専攻 |
| 4 | Ph. D. | 東京大学大学院 特任助教 工学系研究科
社会基盤学専攻 |

は全てのケースについて23.1cmとした。実験地形には図-1のように、沿岸方向に X 、静水汀線から沖方向に Y 軸となる座標系を設定し、以後の実験結果及び数値計算結果は全てこの座標上において論じるものとする。地形急変部は $X=1.5\text{m}$ に位置し、勾配急変部は幅10cmのテーパー部で接続している。

さまざまな条件での波浪の集中機構を検討するため、一様水深部の波高2.8cm、周期1sの規則波と、うねり性波浪に見られるような長周期変動成分の発達しやすい群波の2つを使用した。波向きはいずれも直入射である。群波は2つの相異なる周期（本実験では周期0.9sと1.1s）を有し、かつ波高が同一（本実験では2cm）の波を合成したものである。長周期変動成分の影響も検討するため、群波の造波では非線形二次干渉波（浜田, 1964）も合わせて造波した。

まず、平面水槽の水を染料によって青く染色した。汀線部に黄色の亚克力板による遡上斜面を設け、波の遡上を記録した。これは遡上波の画像解析において遡上波先端が明瞭に識別できるようにするためである。遡上斜面を斜め上方から見下ろすような位置にデジタルビデオカメラを3台、各々が遡上斜面の幅1mを画像内に収めるように設置し、遡上波を連続的に撮影した。ビデオカメラ設置場所と斜面の詳細な位置関係を図-2に示す。撮影に際しては波浪場が定常状態に移行するまでの時間を40秒間とし、その後に規則波・群波について一定時間波の遡上波を撮影した。群波については長周期的な変動についても分析するため規則波より撮影時間を長くとりこととした。

地形急変部周辺の波浪場は、容量式波高計を用いて15cmピッチで測定した。測定時間は、規則波は20秒間、群波は50秒間とした。海浜流の流速はPTV手法により計測した。水槽底面を白色に着色し、測定領域が視野に収まるよう天井にカメラを設置した。そして波の作用下に

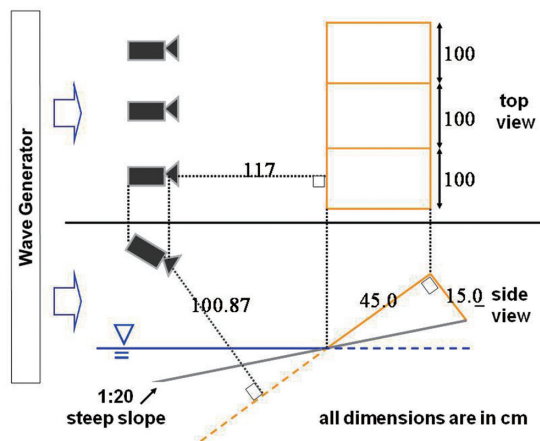


図-2 ビデオカメラによる遡上波の撮影

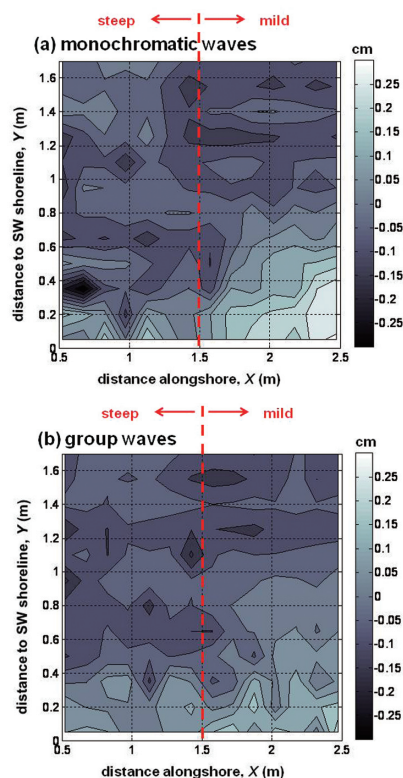


図-3 地形急変部周辺の平均水位分布（実測値）

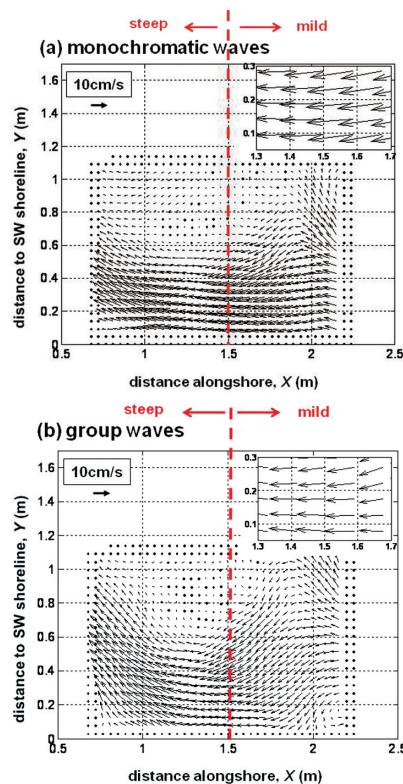


図-4 地形急変部周辺の海浜流分布（実測値）

において粒径9mmで比重が1.05の赤色のトレーサ粒子を領域内に均等に分布するように注意しながら投入して、その追跡から流れ場を推定した。なお、トレーサ粒子は中層から底層を運動したため、数値計算値との比較においてはPTVの分析結果を底面流速場として取り扱うものとした。

(2) 地形急変部周辺の波と流れ

規則波、群波について測定した平均水位上昇値の分布を図-3に示す。図より、平均水位上昇が緩勾配斜面上において大きくなっていることが分かる。これは、緩勾配側の方で碎波が早く起こる分、碎波後の波によるセットアップが効果的に生じているためと推察される。地形急変部の両側では平均水位が大きく変化しているため強い海浜流が生じることが予想される。

規則波、群波のそれぞれについてPTV法によって計測した海浜流を示したものが図-4である。規則波・群波ともに緩勾配斜面側から急勾配斜面側に向かう海浜流が発達している。海浜流は急勾配側で汀線に沿う沿岸流となり、左側境界付近では離岸流を形成している。流れの分布は図-3に示した平均水位上昇分布と対応が良く、平均水位上昇が大きい領域から小さい領域へと流れが生じている。規則波と群波を比較すると、最大波の波高は群波の方が高く、碎波帯は群波の方が広いので、海浜流は群波の方が広い範囲で発達しているが、図-4の右上部に示した汀線付近の拡大図からわかるように、海浜流の強さは群波の方が弱く、流速値は規則波のその0.7倍程度であった。

(3) 最大遡上高さと遡上波のスペクトル

図-5は、30コマ/秒の遡上斜面の撮影画像を連続的に解析して得られた遡上波先端位置 ξ の最大値 $\xi_{\max}$ の沿岸分布である。撮影領域の両端 ($X=0\text{m}$ 付近と $X=3\text{m}$ 付近) においては遡上波を明瞭に捉えられなかったため、 $X=0.2\sim 2.8\text{m}$ の区間のデータのみを考察に用いた。また、遡上運動に及ぼす周波数特性を検討するために、周期1.79秒を境界とし、遡上波先端変位 $\xi(t)$ の長周期変動 ξ_l と短周期変動 ξ_s を抽出し、それぞれのrms振幅値を算出したものを図-5の下段に示す。これらの図において、 $X=1.0\text{m}$ および $X=2.0\text{m}$ の位置では、遡上波変動の統計値にやや不連続が見られるが、これは、3台のカメラの視野の継ぎ目に当たるためである。

最大遡上位置を見ると、規則波については全体的に緩勾配側では遡上が小さく、急勾配側では大きくなる傾向が認められる。また、 $X=0.9\sim 1.1\text{m}$ において遡上波のピークが明瞭に見られる。この領域は地形急変部から急勾配斜面側に50cm程度の距離に位置している。次に群波については、急勾配側で遡上が大きくなるのは規則波と同様であるが、緩勾配側の遡上もある程度大きく、規則

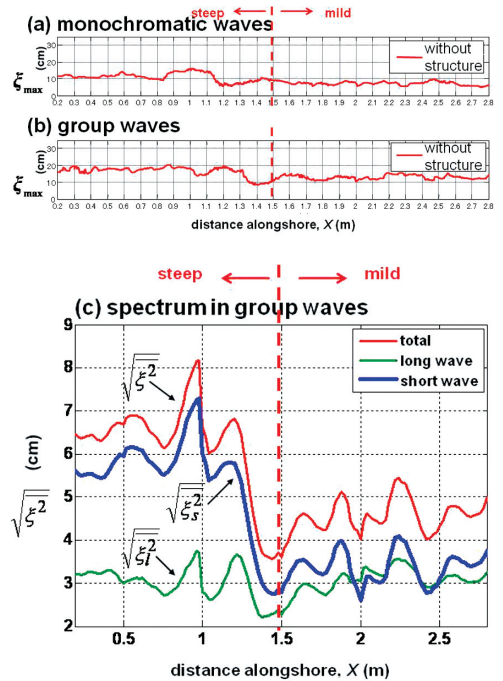


図-5 遡上波の最大先端位置とスペクトル

波と比較して、勾配の差による遡上の変化が顕著ではない。下段のスペクトル特性を見ると、短周期変動成分は緩勾配側では小さく、急勾配側では2倍以上の大きさとなっている。一方長周期変動成分は、急勾配側より緩勾配側の方が10%程度大きい分布となっている。これは、急勾配側では汀線直前まで碎波しないのに対し、緩勾配側では碎波が卓越して短周期成分が減衰するとともに radiation stress の波群スケールでの変動に起因する長周期変動成分が発達するためと考えられる。また、群波における最大遡上位置の沿岸分布は、規則波ほど明瞭ではないが、 $X=1.2\text{m}$ 付近で遡上が大きくなる領域が認められる。地形急変部周辺での $\xi_{\max}$ の変動は、規則波のものよりやや大きい。同領域では長周期変動成分 ξ_l にもピークが見られることから、長周期変動成分の発達が遡上高さにも影響していると考えられる。すなわち、長周期変動のエネルギーが、長周期変動が相対的に卓越する緩勾配側から急勾配側へ侵入し、急勾配側の水位を変動させることにより遡上高さが大きくなる、という機構が存在しているものと考えられる。遡上波を効果的に抑制する対策構造物の配置を考えるうえでは、このような地形に起因する長周期変動の増幅を抑制することも重要であると考えられる。

(4) 減災対策構造物の検討

減災対策構造物の検討では、特に遡上が卓越する急勾配斜面側において遡上波の低減を効果的に行うことが求められ、地形急変部に見られる最大遡上ピークを低減す

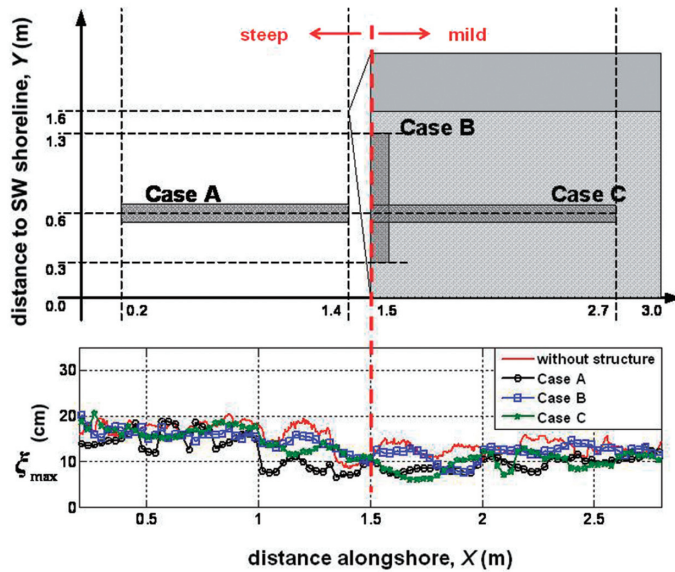


図-6 減災対策構造物の配置と最大遡上位置の分布

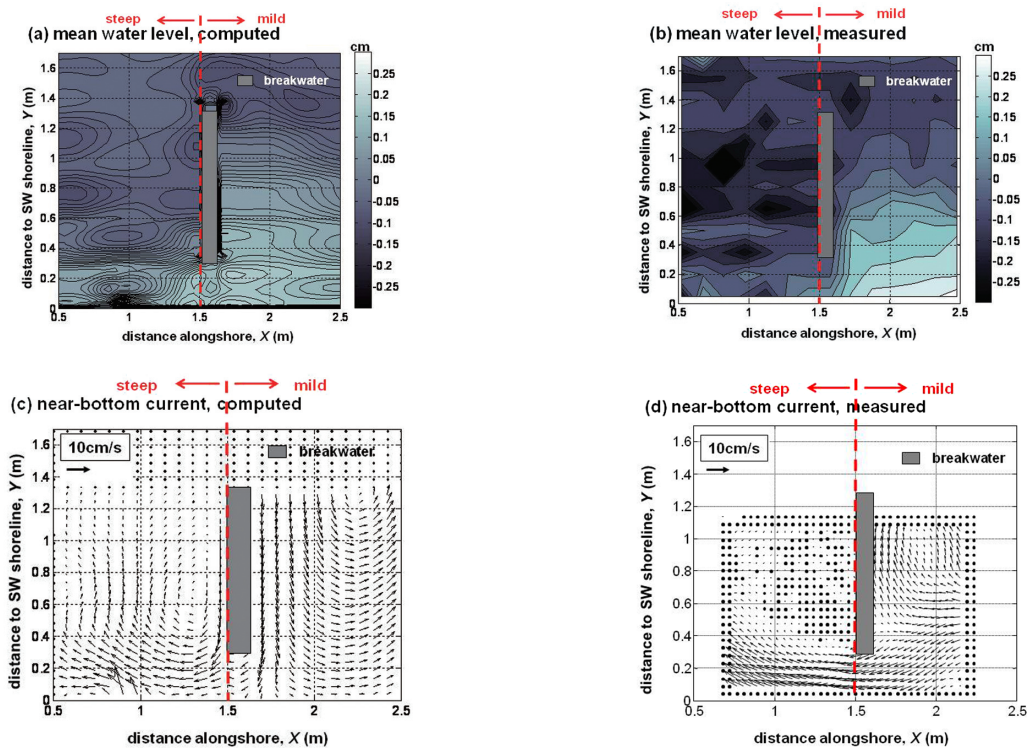


図-7 減災対策構造物設置条件での平均水位と海浜流 (ケースB)

ることが肝要である。構造物の種類として潜堤、離岸堤、突堤を考え、設置位置（急勾配斜面側、緩勾配斜面側、地形急変部）を変化させた合計9ケースに対して、規則波条件で遡上波の変化を測定した。その結果、急勾配斜面側に離岸堤を設置するケースA、地形急変部に突堤を

設置するケースB、緩勾配斜面側に離岸堤を設置するケースCの順に遡上波が低減されることが分かった。これら3ケースのレイアウトおよび規則波に対する最大遡上位置の分布を図-6に示す。なお、構造物としては透過性のあるもの（消波ブロック模型で作成）と不透過のもの

(コンクリート塊で作成)を試用したが、遡上波を著しく低減できたケースAからCはいずれも透過性構造物を使用したものである。

図-6の最大遡上位置の分布を見ると、急勾配斜面側に離岸堤を設置するケースAは急勾配側の遡上波低減に極めて効果的であることがわかる。ただし、急勾配海岸における構造物の導入は困難であることが多いので、本研究では、コスト面においても有利であると考えられるケースB、Cについてその有効性を検討することにした。緩勾配斜面側に離岸堤を設置したケースCでは、緩勾配側の遡上波が減少しているのに加えて、地形急変部周辺の $X=1.1\sim 1.3\text{m}$ においても遡上波の減少が見られる。汀線からやや離れた位置に突堤を設置したケースBでも打ち上げ高のピークが全体的に解消されており、構造物なしの条件で見られた地形急変部での局所的に高い遡上が減少している。突堤を汀線に接地する場合や、突堤を不透過とした場合には、地形急変部ごく近傍で構造物からの反射波が卓越し、構造物なしの条件より遡上波が高くなる区間が見られた。このように、緩勾配斜面側や地形急変部における構造物の設置が、やや離れた地域の遡上波の低減に効果的であることは興味深い。これらには長周期変動の発達や波と流れの干渉が影響しているものと考えられるため、数値モデルによりその機構の再現について検討することにした。

3. Boussinesq モデルによる数値計算

数値計算には波浪の非線形性や波と流れの干渉機構を考慮することが出来る Boussinesq モデル (Ranasinghe, 2009) を用いた。遡上波の挙動に関しては、砕波帯における radiation stress の時空間挙動の把握が重要となるが、Boussinesq モデルは非線形項を含むため、砕波モデルが適切であれば、遡上特性の分析に有力であると考えられる。まず、構造物なしの状態での地形急変部周辺での波浪・流れ場の再現性を確認した。次に、構造物を設置した場合について、波浪・海浜流場の変化が計算によってどのように再現されるのかを検討した。図-7は、ケースBについての平均水位分布と海浜流速分布について、計算と実験を比較したものである。緩勾配斜面上の砕波帯内で平均水位が上昇するのは構造物なしの条件 (図-3) と同様であるが、突堤を設置した場合には、水位上昇が緩勾配斜面側に閉じ込められる傾向にある。また、汀線付近の突堤の開口区間から強い海浜流が生じているが、その向きは沿岸方向に平行であり、構造物がない場合に見られた沖合にまで広がる離岸流 (図-4) はほとんど見られない。このことから離岸流が入射波と干渉することによって生じる波浪集中が解消され、遡上斜面での遡上波の増大が抑制されたものと考えられる。緩勾配斜面側

では海浜流が極めて弱く、詳細な比較は困難であるが、実験と数値モデルで循環流の向きが逆になっている。緩勾配斜面上では崩れ波型の砕波が徐々に進行するが、このような条件での砕波減衰モデルに改善の余地があると考えられる。

4. おわりに

本研究では、長周期うねり性波浪の沿岸での挙動に関して、実験と数値計算により検討した。その結果、長周期うねり性波浪は、沿岸域の複雑な地形の影響を受けて局所的に集中するとともに、強い海浜流や長周期変動を発達させることを確認した。また、これらがさらに波浪と干渉することにより、地形急変部周辺で局所的な波浪集中と遡上波の増大を引き起こすことを明らかにした。対策としては、波の遡上が大きくなる急勾配区間での構造物設置に加えて、海浜流や長周期変動の発達元となる緩勾配区間での構造物導入も有効であることが示された。海浜流や長周期変動の平面的な分布を考慮した構造物配置の検討が効果的である点が、長周期うねり性波浪の特徴であると考えられる。

海岸堤防への遡上や越波を考慮すること、現地地形において構造物の効果を詳細に検討することが今後の課題である。

本研究は、(独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構・運輸分野における基礎的研究推進制度による研究課題「長周期巨大波浪の発達・変形機構と減災対策」による研究成果の一部であることを付記する。

参 考 文 献

- 田島芳満・佐藤慎司・吉井拓也・細川順一・山田浩次・石川仁憲・三波俊郎 (2008) : 西湘海岸における2007年台風9号による被害の集中機構, 海岸工学論文集, 第55巻, pp. 1386-1390.
- 田島芳満・石指裕章・佐藤慎司 (2009) : 地形急変部周辺における長周期変動を伴う波・流れ場の局所集中機構, 土木学会論文誌B2 (海岸工学), 65-1, pp. 211-215.
- 中村伸也・西川一・山田秀夫・原文宏・神保正暢・平野宜一 (2008) : 平成20年2月24日の高波による下新川海岸の被災実態について, 海岸工学論文集, 第55巻, pp. 176-180.
- 浜田徳一 (1964) : 表面波の2次干渉, 第12回海岸工学講演会講演集, pp. 12-18.
- 深瀬祐太郎・Suminda Ranasinghe・田島芳満・佐藤慎司 (2009) : 下新川海岸におけるうねり性巨大波浪の変形機構, 土木学会論文誌B2 (海岸工学), 65-1, pp. 1411-1415.
- 間瀬 肇・安田誠宏・Tracy Tom・辻尾大樹 (2008) : 富山湾沿岸に災害をもたらした2008年2月冬季風浪の予測と追算シミュレーション, 海岸工学論文集, 第55巻, pp. 156-160.
- Ranasinghe, R. S. (2009) : Modelling waves and currents around submerged breakwaters and over complex bathymetries, Doctoral thesis submitted to Department of Civil Eng, The University of Tokyo, 155p.