西湘海岸における2007年台風9号による被害の集中機構

Locally Concentrated Damages and Erosions on Seisho Coast Caused by Typhoon T0709

田島芳満¹・佐藤慎司²・吉井拓也³・細川順一⁴・山田浩次⁵・石川仁憲⁶・三波俊郎⁷

Yoshimitsu TAJIMA, Shinji SATO, Takuya YOSHII, Junichi HOSOKAWA

Koji YAMADA, Toshinori ISHIKAWA, Toshiro SAN-NAMI

This paper explores physical mechanisms of locally concentrated damages and erosions observed on Seisho coast caused by typhoon T0709. Field survey was first conducted to capture alongshore distributions of hydrodynamic forces during the storm. The measured water mark elevations showed certain periodic undulation along the coast and their peak was located at the most damaged area. Time-series of surface water levels and velocities recorded at Hiratsuka Experiment Station were then analyzed and it was found that both free and bounded long waves grew as T0709 approached to the damaged site and short wave heights increased. Numerical analysis is finally carried out to investigate how free long waves and nearshore currents affect observed locally concentrated damages.

1. はじめに

2007年9月に来襲した台風9号(T0709)は, 西湘海岸を中心に大規模な海岸侵食や西湘バイパス崩壊などの甚大な被害を引き起こした(図-1)が, その被害の程度には局地性が認められた. 佐藤ら(1998)によれば, 同海岸は1997年の台風20号(T9720)により被災したが, このときも被害の程度には局地性が見られた. 本研究では, 現地観測に基づき痕跡高を指標として外力場の沿岸方向分布を定量的に把握し, さらに, 沿岸域における波浪観測データの分析や数値モデルを用いた検証計算を通じて被災の集中メカニズムの解明を試み, 同地点における今後の海岸防災施策に資する有用な知見を得ることを目的とする.

2. 被災状況の分析

(1) 台風0709号の概要

図-2にT0709号およびT9720号の経路を, 図-3に西湘海岸周辺の地形図を示す. 図に見られるように, T0709は伊豆半島を縦断し, 西湘海岸には東寄りの強い南風によって, うねりを伴う高波浪を来襲させたと考えられる. 一方, T9720号は本土には上陸しなかったものの, 西湘海岸南西の海上で停滞し, 西湘海岸に南東からの強い風が卓越していたと推定される. 以上より, 西湘海岸に甚

図-1 西湘バイパスの被災状況(9月7日14時)

大な被害を引き起こしたT0709およびT9720は, 相模湾の開けた南東方向からの吹送距離の長い風が卓越していた点で共通していたと言える.

(2) 痕跡高と被災状況

西湘海岸における被害状況の全容を捉えるために, 西湘バイパスの崩壊など最も甚大な被害が見られた二宮インターチェンジ(I.C.)を中心とした約20kmの沿岸域を対象に現地調査を行った(図-4(a)). 現地調査では, 外力場の沿岸方向分布を定量的に捉えるために, 海岸線に沿って痕跡高を計測した. 痕跡の判定には, 主に後浜の植生の侵食痕を用いたが(図-5(a)), コンクリート護岸で覆われた地点では, 漂流物の痕跡や被災直後の目撃証言を用いた. また二宮I.C.周辺では, 越波が観測されたため(図-5(b)), バイパス路面の標高を痕跡高とした.

このようにして合計37地点で計測した痕跡高の沿岸方向分布を図-4(b)に整理する. 図より, 痕跡高は二宮I.C.周辺でピークを持ち, 同地点から大磯港にかけて局所性のある分布を有していたことが分かる. さらに, 二宮I.C.から約7km西に位置する国府津周辺においても, 高い痕跡高が観測された. この傾向は佐藤ら(1998)らが報告したT9720に伴う被災傾向とも一致する.

1 正 会 員 Ph.D. 東京大学准教授 大学院工学系研究科社会
基盤学専攻
2 フェロー 工博 東京大学教授 同上
3 学生会員 東京大学大学院修士課程学生 同上
4 神奈川県県土整備部砂防海岸課 福祉官
5 正 会 員 国土交通省国土技術政策総合研究所
6 正 会 員 工修 (財)土木研究センターなぎさ研究室主任研
究員
7 海岸研究室(有)

図-2 台風経路

図-3 西湘海岸および相模湾周辺図
(図中の枠は数値計算領域を表す)

図-4 (a)調査地周辺図および次の諸量の沿岸方向分布: (b)痕跡高, (c)土砂変化量(岸沖方向に汀線から120mまでの領域とその沖側で水深30m以下の領域), (d)平均水位(計算結果), (e)長周期水位変動振幅, (f)短周期波の有義波高(計算結果), (g)水深30mまでの西向き沿岸漂砂量(調査結果と計算結果)

図-5 (a)植生の侵食痕(地点②), (b)二宮I.C.周辺の越波(9月7日16時), (c)護岸前面の侵食状況(地点③), (d)礫浜の侵食(地点④)

(3) 地形変化

次に, T0709来襲前後の2007年3月および同年9, 10月の測量結果を比較する。図-4(c)は, 岸沖方向を汀線から120mまでと, そこから沖合の水深30m地点までの2つの区域に分割し, 沿岸方向の単位幅あたりの土砂変化量を示したものである。図より, 汀線近傍は全体的に侵食傾向で, 逆に沖合は堆積傾向であることがわかる。特に, 二宮I.C.の東で汀線近傍の侵食量が最大となっている地点(図-4(a)③)では, 護岸前面の砂面が約4m低下し, 消波ブロックの崩落が見られた(図-5(c))。さらに国府津地

点においても, バイパス道路橋脚基部周辺の礫浜で1m強の侵食が見られた(図-5(d))。

3. 平塚観測点における波・流れ場の分析

次に平塚海岸沖合1km地点にある観測塔で取得した水位, 流速, 風速等の観測記録を分析する。本論文では, 長周期と短周期の波を区別して分析・比較をするため, 周期30s以上の波を長周期波, 30s未満の波を短周期波と呼ぶことにする。図-6には, 短周期波の有義波高とエネルギー平均周期, 長周期波の自乗平均波高とエネルギー

平均周期, 平均流速, 風速の観測時系列と, 調和解析に基づく潮位の予報値を示す. 以下, それぞれの観測諸量について整理する.

(1) 短周期波

図-6(a)および(b)より, 9月4日17時頃から短周期波に対する台風の影響が明瞭になっている. 周期は4日19時頃から10s前後で安定し, 6日7時から19時にかけて14s程度と長くなったのに対し, 波高は6日23時頃まで一貫して増大しピーク有義波高が6.09mに達している. 周期が14s程度と大きな値で安定したのは台風の接近によりうねりの影響が増大したためであると考えられる.

(2) 長周期波

各時刻における水位の時系列データをスペクトル解析したところ, 周期50秒~90秒にかけて長周期波成分のピークを確認し, 周期30秒以上の長周期成分波の平均周期は70秒程度であった(図-6(c)). 次に水位データから推定した長周期波を拘束波と自由波に分離し, それぞれの自乗平均波高を図-6(d)に示した. ここで拘束波成分は, 単一方向進行波群の2次の拘束波として佐藤ら(1997)と同様の手法で算定し, 自由波成分は水位の時系列データに周期30sのフィルターをかけて抽出した長周期水位変動と, 拘束波成分のそれとの差をとって算出した. 図より, 台風の接近に伴い, 波群による拘束波の影響が大きくなり, 台風が通過すると拘束波が急減している. また6日9時前後には, 拘束波と自由波の波高は同程度であるが, 同20時から翌日2時にかけては, 自由波の波高が拘束波に比べて2~3倍程度になっている. この時間帯は台風が最も観測地点に接近した時間帯であり, 波群を伴ったうねりよりも, 強風による風波と自由長周期波が卓越していたことを示唆していると考えられる. また図-7(a)および(b)には, 観測データに基づく長周期波(自由波+拘束波)および自由長周期波の時々刻々の方向別流速成分をプロットした. これにより観測した自由長周期波は方向集中度の低い多方向の成分を有していたことが分かる.

(3) 平均流

図-6(e)に示した岸沖(南北)方向と沿岸(東西)方向の平均流速成分より, 台風最接近に合わせて西向きに平均流が強くなったことが分かる. これは, 台風接近に伴う短周期波の radiation 応力と, 東風の増大によるものと考えられる. また, 南向き(沖向き)の流速は, 主として短周期波による戻り流れと考えられ, 台風通過時のピークの立ち上がりは沿岸流ほど鋭くなく, 波高の上昇と傾向が一致しているようである.

(4) 風速

図-6(f)に風速の観測値を示す. 9月4日から5日にかけては5~8m/sの北風が, 台風が接近する6日から7日にか

図-6 短周期波の(a)有義波高および(b)平均周期, (c)長周期波の(c)自乗平均波高および(d)平均周期, (e)北向きおよび西向きの平均流速成分(観測結果, 計算結果), (f)風速(観測値), (g)風速(予測値), (h)伊豆大島・岡田地点における潮位(予報値)

図-7 長周期波(観測値および自由波成分)の流速成分 (横軸: 岸沖方向, 縦軸: 沿岸方向)

けては最大で27.3m/sの東風が, 台風の通過に伴い7日未明からは南西の風が, それぞれ卓越している.

4. 数値モデルによる被災メカニズムの分析

被災調査結果より, 台風T0709による同海岸の被害は強い局地性を有しており, またT0709来襲時には短周期波に加えて長周期波も卓越し, 長周期波成分には, 拘束波と同等以上のエネルギーを有する多方向自由波が含まれていることが明らかとなった. このような長周期変動を含む外力場と被害の集中機構の因果関係を明らかにするために, 以下に示す数値解析による分析を行った.

(1) 数値解析の概要

台風の通過に伴う広域の水位・流速場の変動を計算す

るため、相模湾全域(図-3広領域、格子幅200m)を計算領域とするブシネスク方程式による高潮計算を行った。台風による気圧場と風速場は藤田モデルによって計算し、風によって海面に作用するせん断応力の算定には本多・光易(1980)の C_D 値を用いた。台風モデルによる風と気圧場の計算においては、台風の最大風速半径が重要なパラメタになるが、本計算では、計算領域周辺の3地点(横浜、小田原、大島)における気圧の観測値を最もよく再現する値を、最小自乗法を用いて10分毎に算定した。

次に、短周期波高が極大となった時刻である9月6日23時を対象に、図-3に示した沿岸方向約19km、岸沖方向約7kmの狭領域(格子幅20m)における長周期波および海浜流場の再現計算を行った。モデルの基礎方程式は鉛直方向には積分した2次元平面の非線形長波方程式に従い、風によるせん断応力項とRadiation応力項、水平拡散項(Larson・Kraus, 1991)と、Madsen(1994)モデルに基づく波・流れ共存場での底面摩擦項を付加した。風によるせん断応力の平面分布は、広領域の計算結果から内挿して算定し、radiation応力項、水平拡散項および底面摩擦項の算定に必要な短周期波の平面分布は、波作用量方程式を用いて算定した。ここで沖側境界における短周期波の入射波諸元は、平塚観測点における6日23時のデータから逆算した。

これらの外力項に加え、自由長周期波による影響を考慮するために、沖側境界から次の手順で長周期変動波成分を入射させた。(1)周期50秒~90秒を500等分割し、それぞれの周期波に、入射角($-45^\circ < \theta < 45^\circ$)および位相差を一樣確率でランダムに設定する。(2)これらの個々波を線形波で表し、境界線上の各計算格子点の位置の違いによる位相差を考慮しながら各点での水位や流速成分を足し合わせる。(3)個々波の振幅は周期や波向きによらず一定とし、その値は平塚観測点における自由長周期波成分の自乗平均振幅が分析結果と一致するように調整する。

沖側および側方境界では、線形長波理論に基づき反射波成分を透過させた。また、側方境界位置は相模川および酒匂川の河口とし、沿岸海浜流速は比較的小さいと仮定してスポンジ層を設置して流速を低減させた。

最後に対象とする高波浪条件では、強い海浜流やsetupに伴う水位上昇により、短周期波の伝播・変形特性に影響を及ぼすと考えられるため、本研究では長周期波および海浜流場の計算と波作用量方程式による計算を繰り返し、両者の相互作用を考慮した。

(2) 広領域計算結果の分析

図-6(g)に、平塚沖1km地点における風速の計算結果を示す。台風が接近・通過する9月6日から7日にかけては、風の計算結果は観測された風速の傾向を概ね再現できて

いるが、風速のピーク値は計算結果では20m/s程度と、観測値の27.3m/sの再現は不十分である。一方、台風が遠方に位置する9月4日、5日は、観測されていた北風が再現できていないが、この北風成分は台風以外の成因によるものであると考えられる。

図-6(e)には、平塚観測塔における平均流速成分の観測値と計算結果を比較した。図より沿岸(東西)方向の流速に着目すると、モデルでは流速がピークに達するまでの立ち上がりが観測値よりもやや早く計算されているものの、ピークの値と時刻を妥当に再現できている。これは、台風来襲時の沿岸海浜流の形成には、radiation応力よりも風による応力が卓越的に作用していることを示唆している。またモデルでは、南向き流速を過小評価しているが、これは短周期波の戻り流れによる影響を考慮していないことや、前述した北風を再現できていないことなどが原因として考えられる。

(3) 狭領域計算結果の分析

図-8に、計算された自由長周期波の自乗平均振幅を示す。図から、被災区間前面で水位変動が特になくなっていることが分かる。これは、被災区間前面の海脚により長周期波が屈折して集中したことや、海脚辺縁部における水深の急激な変化により長周期波が反射し、沿岸方向にも部分重複波を形成していることなどが原因として考えられる。図-9(1)および(2)には、図-9(0)に示した線分上での水位変動および流速変動の自乗平均振幅を図示した。これにより、水位と流速の自乗平均振幅が沿岸方向、岸沖方向の双方向で互いに逆位相となっており、被災区間周りで部分重複波が形成されていたことが分かる。自由長周期波によって沿岸域災害が助長される要因の

図-8 水位変動の計算結果(等深線は100m間隔)

図-9 水位変動と流速変動の比較(0)断面位置、(1)断面1、および(2)断面2における水位・流速変動の自乗平均値

ひとつとして、長周期の水位変動に伴う水深変化が考えられる。たとえば、水位変動に伴い水深が増加すると、短周期波の碎波減衰率が低減し、来襲波が大きなエネルギーを持ったまま海岸線に到達することになる。そこで、上述した狭領域の非線形長波計算結果による平均水位の変化量と自由長周期波の自乗平均振幅を静水深に加えた水深条件に対し、波作用量方程式を用いて平均流と波との干渉を考慮した短周期波の伝播・碎波計算を実施した。図-4(e)には、計算した短周期波の汀線付近での波高を抽出し、その沿岸方向分布を図示した。これにより、被害が小さかった相模川から大磯港までの領域では波高が小さいのに対し、被災区間周辺では海岸線付近の波高が局所的に大きくなっていることが分かる。また国府津付近では、自由長周期波の振幅が小さいにも関わらず、非常に高い波高が計算された。これは、この地点での汀線付近が急勾配であることが原因であり、調査で計測した痕跡高や、礫浜の侵食などの現象を説明している。

最後に、観測で随所に見られた海浜侵食と外力場との関係を検証するために、渡辺ら(1984)の局所漂砂量算定式を用いて、次の手順で漂砂量分布を計算した。まず、計算される自由長周期の変動成分を含む流れ場を平均流として考え、時々刻々の局所漂砂量フラックスを計算し、その時間平均値を正味の平均局所漂砂移動量として算出した。次に得られた平均局所漂砂量の沿岸方向成分を汀線から水深30m地点まで積分して沿岸漂砂量を求めた。ここで、局所漂砂量式中の係数 B_0 の算定には、特別な合わせ込みは行わず、清水ら(1996)のモデルによる中央粒径 $D_{50}=0.35\text{mm}$ に対する値をそのまま用いた。

まず平均流成分に着目すると、本計算は平塚観測点における観測結果(沿岸方向に約63cm/s)を妥当に再現できていた。次に、図-4(f)に、計算結果と観測結果による沿岸漂砂量の沿岸方向分布を示す。漂砂量は西向きを正とし、その沿岸方向分布が右肩上がりなら侵食傾向であることを示す。計算では9月6日23時の波浪の状態が12時間継続すると仮定した。実測値の沿岸漂砂量は、大磯港を越える沿岸漂砂量がゼロであると仮定して、2で議論した土砂変化量を水深30m地点まで積分し、さらにその積分値を沿岸方向に積分して算定した。30mの等深線を越えての土砂移動が無いと考えれば、これが西向きの沿岸漂砂量と一致する。図より、モデルは被災地点の東側で西向き、西側で東向きとなる全体の漂砂移動傾向を再現し、特に大磯港の西側(図-10)や、被災地点の東側における侵食傾向も妥当に再現されている。但し、被災地点周辺における海岸線付近の侵食には、2で議論した冲向きの土砂移動量による影響も大きかったと考えられ、モデルによる更なる検証が必要であろう。

図-10 大磯港西側の侵食状況(T0709来襲以前は、写真中央の消波工前面を歩行可能な砂浜が存在していた)。

4. おわりに

T0709の来襲では、大磯付近の西湘BP等に被害が集中するなど被災状況に大きな局地性が見られた。被災地に近い平塚観測塔での水位と流速の観測結果から、周期50~90sの多方向自由長周期波が発生していたことが明らかとなり、被災に対する長波の影響が示唆された。この影響を検証するために数値計算を行ったところ、前面の大磯海脚により長波が屈折して被災区間に集中するとともに、海脚辺縁部の急勾配によって長波が反射し、被災区間周辺の海域で沿岸方向と岸沖方向に重複波を形成する様子が再現された。これにより被災区間で長周期の水位変動が増大し、それに伴い短周期波の有義波高も大きくなることが示された。さらにこの効果を考慮して沿岸漂砂量を計算した結果、測量結果から推定される沿岸方向の土砂移動量を概ね再現できた。ただし、測量結果からは岸沖方向の土砂移動も大きかったことが分かっており、今回の被災においては沿岸漂砂のみでは説明できない土砂移動も大きいと考えられる。

本研究の実施に際し、国土交通省関東地方整備局横浜国道事務所、神奈川県、防災科学研究所平塚実験場から貴重なデータをご提供いただいた。また、現地調査では、横浜国道事務所の皆様、神奈川県の皆様、東京大学の高川智博氏、佐々木勇弥氏、小川裕貴氏にご協力いただいた。ここに記して深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 佐藤慎司・小杉俊夫・加藤憲一・口石孝幸(1998)：西湘海岸における台風9720号による海岸災害とその原因，海工論文集，第45巻，pp.256-260。
- 佐藤慎司(1997)：浅海域における長周期流速変動の発達特性，海工論文集，第44巻，pp.256-260。
- 清水琢三・山田晶子・清水隆夫・榊山 勉(1984)：沿岸漂砂量の岸沖分布と漂砂量係数，海工論文集，第43巻，pp.571-575。
- 本多忠夫・光易恒(1980)：水面に及ぼす風の作用に関する実験的研究，第27回海工論文集，pp.90-93。
- 渡辺 晃・丸山康樹・清水隆夫・榊山 勉(1984)：構造物設置に伴う三次元海浜変形の数値予測モデル，第31回海岸工学講演会論文集，pp.406-410。
- Larson, M and N.C. Kraus (1991)：Numerical model of longshore current for bar and trough beaches, J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., vol.117, No.4, pp.326-347。
- Madsen, O. S. (1994)：Spectral wave-current bottom boundary layer flows, Proc. 24th Int. Conf. on Coast. Eng., pp.384-398。