

中国・温州における高潮氾濫・波浪災害について

河田 恵昭* ・中 川 一** ・安田 孝志***・角 野 昇 八****
 間 瀬 肇*****・水谷 法美*****・島田 広昭*****

1. はじめに

平成6年8月21日、上海の南方約400 kmに位置し、東シナ海に面する温州付近に上陸した台風17号(FRED)によって、高潮と洪水の同時氾濫が発生した可能性が大きく、温州地区だけでも死者は建物の倒壊によって562名、溺死497名、その他8名の計1067名を数え、負傷者は300名以上に達した。氾濫災害による被災者は135万人に達し、避難を余儀なくされた人は29万人にのぼり、物的被害の主なものだけでも全壊家屋52,000戸、橋梁の流失186橋、海岸護岸の被害延長259 km、河川堤防の破堤746ヶ所を数えた。わが国では8月25日付の新聞でその被害の概要が紹介された。筆者らは、すぐに上海にある華東師範大学の海岸河口研究所の所長宛にファックスを打ち、共同調査を申し出るとともに、自然災害総合研究班を通して文部省に突発災害調査の申し出を行った。しかし、先方から9月の下旬になっても何ら返事がなく、ほぼ断念せざるを得なかった。しかし、どうも高潮と洪水の同時氾濫という極めて希なケースであることが濃厚であることや越波被害が大きいと推定されたことから、自費調査をする予定で上記7名で調査計画を作り終えた。ところが10月に入って突如、先方から共同調査の申し出があり、文部省と再度交渉の結果、突発災害調査が了承された。メンバーは、高潮・洪水の同時氾濫について、河田・安田・中川が担当し、高波浪による海岸構造物の被災について、角野・水谷・島田が、波浪変形について間瀬が担当することになり、11月初旬に2班に分かれて出国し、同研究所の4人の教授らと現地入りして調査を約1週間行った。

2. 災害の実態

調査隊の帰国後、中国側から詳しい水文資料や地形情報の資料の提供がない状態が続いた。しかも、現地に滞

在中、温州市当局は中国側の研究者らにはっきりと協力拒否の旨の返事をしたことを聞いていた。中国のとくに沿岸部各都市では、競って経済開発を行っており、災害の実態があからさまになって諸外国からの投資が減るようなことになると大変困ると言われている。そこで、現段階でも実態と定性的な推定しかできないわけである。

(1) 死者数がなぜこれほど大きかったのか

現地での聞き取り調査と温州日報などの新聞記事から、次のように判断される。

1) 台風の規模の割に強風が吹いたこと：図-1に中国中央台提供の台風経路を示す。上陸時の中心気圧は960 hPaであったが、上陸した瑞安付近では最大平均風速が37から50.4 m/sに達した。このために建物が多く倒壊し、257 kmにわたって送電線が被害を受けた。

2) 台風の上陸と満潮とが重なって高潮が発生したこと：台風は22時30分頃上陸した。21日は温州の大潮に当たり、最高推算天文潮位は22時42分の558 cm+黄海D.L.であり、最高潮位は23時30分の同735 cmと記録されている。推算天文潮位の時間変化から求められる最大偏差は22日0時で220 cmとなった。また、最高潮位時の潮位偏差は210 cmである。図-2にOu江の河口付近を示す。温州の水位計が河口からおよそ20 km上流に位置しており(東経120°39'、北緯28°2')、次に述べる洪水

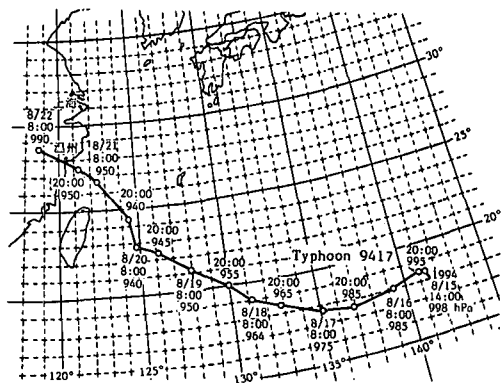


図-1 台風17号の経路図

- * 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所
- ** 正会員 工博 京都大学助教授 防災研究所
- *** 正会員 工博 岐阜大学教授 工学部土木工学科
- **** 正会員 工博 大阪市立大学助教授 工学部土木工学科
- ***** 正会員 工博 京都大学助教授 工学部土木工学科
- ***** 正会員 工博 名古屋大学助教授 工学部土木工学科
- ***** 正会員 関西大学助手 工学部土木工学科

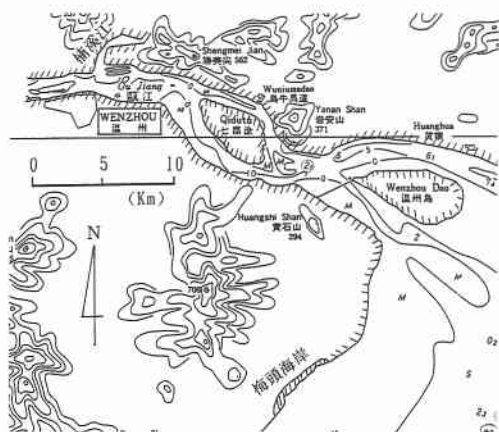


図-2 Ou 江河口付近の概略図



写真-2 上流側から進入した氾濫水による倒木状況



写真-3 下流側の小屋に残る浸水痕跡



写真-1 温州市の中のある島にある禅宗寺院での浸水痕跡



写真-4 楠溪江の乗船待合室の浸水状況

による水位上昇量も含まれていると考えられるので、この偏差が高潮のみによってもたらされたかどうか疑問が残る。写真-1 は Ou 江の中のある島にある禅宗寺院での土製彩色像の水浸による脱色状況を撮影したものである。土台からおおよそ 1.5 m 浸水したことがうかがわれる。写真-2 は同島の西端 (川の上流側) から下流側を撮影したものであって、立木が押しなべて下流方向に倒れており、洪水が乗り上げて流下したと判断され、高潮の逆流によるものでないことがわかる。写真-3 は島の東端 (海側) での浸水痕跡であって、おおよそ地上 1.7 m のところに位置していた。これらのことから、高潮と洪水がこの島付近でほぼ同時に生じたことは間違いないところであるが、両者がどれくらいの大きさであったかは現在のところ資料不足で解析できていない。

3) 記録的な豪雨であったこと: Ou 江と温州市付近で合流する左支川の楠溪江では最大洪水流量が 8900 m^3/s あり、日最大降雨量として温州市永強で 403 mm、さらに海岸に近い采清で同 620 mm (浙江省の最大記録) となるなど記録的豪雨であったことは間違いない。写真-4 は楠溪江の合流部約 30 km に位置する船着場の待合室の壁面に残された痕跡で、調査当時の水面から約

10 m 以上の水位上昇が当時の洪水時にあったと推定される。

4) 8月7日に温州市付近に上陸が予想されていた台風 14 号が、予想に反して台湾付近を通過後、進路を北に変えたため、中国気象庁の予報の信頼性に対する住民の期待を裏切ることになった。このため、17 号が 14 号に比べて規模が小さかったこともあって、住民は今回も大丈夫と考えていたふしがある。

(2) 海岸構造物の被害

写真-5 にあるように、石張りの海岸堤防の決壊が至るところで観察された (霊昆島)。ただ、高さが海面上 2, 3 m のものが多く、しかも前面に砂浜がなく高潮による潮位上昇と暴浪の越波のために強度が不足して決壊したと考えられる。写真-6 は堤防背後の農家の浸水状況であって、2 階の窓枠の半ばまで浸水した状況がうかがえる。ただし、海岸堤防の背後にすぐに集落があるのでは

なく、写真-7のようなみかん畑や養魚池が両者の間に設けられている場合が多く、人的な被害はそれほど多くないと推定された。なお、写真-8は調査当時の波高約1 m程度の波による越波状況であって、前浜がなく堤体に入射波が直接衝突し、反射波となって重複波が形成される様子が観察された(梅頭海岸)。早晚、この海岸堤防は全壊すると言える。なお、写真-9は海岸近傍の松並木の折損状況であって、樹高7, 8 mで幹の直径20 cmのものが地上2, 3 mで陸側に向かって折れている様子がうかがえる。海岸付近で猛烈な風が吹いた証拠であろう。

3. 解析の試み

(1) 高潮の予備的追算

ここでは、高潮の単純な発生機構に基づく予備的な追算を行った結果について述べる。高潮の発生外力は低気圧と風である。まず、低気圧は海面を吸い上げるが、そ

れによる潮位上昇は、

$$\eta_p = \Delta p / \rho g \quad \dots\dots\dots (1)$$

と表される。ここに、 Δp : 気圧低下量、 ρ : 海水の密度、 g : 重力加速度である。次に、風は海面の摩擦を通じて海面を傾斜させるが、この吹寄せによる傾斜量 $d\eta_w/dx$ は

$$\frac{d\eta_w}{dx} = f_w(1+\lambda) \frac{\rho_a}{\rho} \frac{U^2}{gh} \quad \dots\dots\dots (2)$$

と表される。ここに、 f_w : 海面の摩擦係数(約0.0026)、



写真-8(a) 東シナ海に面する海岸堤防の被災状況



写真-8(b) 越波状況



写真-5 石張りの海岸堤防の被災



写真-6 海岸堤防背後の農家の浸水痕跡



写真-7 海水の進入によって枯れたみかん畑



写真-9 陸に向かって倒れた松並木

λ : 海底面と海面における摩擦応力の比, ρ_a : 空気の密度, U : 平均風速, および h : 水深である。台風 17 号に対しては, 気圧低下量 50 hPa, および最大風速 50.4 m/s が得られているが, これより平均風速を 25 m/s とする。また, 海岸からの距離 80 km にわたって, 静的な水深が 0~40 m と直線的に変わるものとすれば, $\eta_p=0.50$ m, $\eta_w=1.04$ m, したがって $\eta=1.54$ m を得る。この値は現地調査の結果とほぼ整合しており, さらに詳細な要素も含めて数値シミュレーションを行うことにより, より正確な値が得られるものと期待される。

(2) 波浪変形

入手した波高および周期に関する資料によると, 沖波有義波高 H_0 が 8 m, 周期 T_0 が 8 s であった。これより, 沖波有義波長 L_0 は約 100 m となる。 T_0 を 10 s とすると約 150 m である。そこで, $H_0/L_0=0.08$ と $H_0/L_0=0.05$ について有義波高 $H_{1/3}$ および 1/100 最大波高 $H_{1/100}$ を間瀬の方法 (1986) で求めたものが図-3 である。ただし, 海底勾配は 1/100 としている。

(3) 海岸堤防に作用した波圧の推定

図-2 に示した梅頭海岸には, 堤内地側に広大なエビの養殖場があり, これを防護するために図-4 に示するような海岸堤防が設けられていた。この海岸堤防は今回の台風で壊滅的な被害を受けたが, ここでは, この海岸堤防に作用したと思われる波圧を推定してみる。

同図より, 台風来襲時の堤体前面水深は, $h=7.35-4.50=2.85$ m となる。図-3 より, $h=2.85$ m に対して $h/H_0=0.36$ であるので, 最も大きな波高を与える曲線より, $H_{1/100}/H_0=0.25$ となり, $H_{1/100}=2$ m が得られる。

作用波圧の内, 最も大きな静水面におけるもの p_1 および底面での波圧 p_2 を合田式 (1990) により求める。合田式によれば,

$$p_1 = \frac{1}{2}(1 + \cos \beta)(\alpha_1 + \alpha_2 \cos^2 \beta)w_0 H_{\max} \cdots (3)$$

$$p_2 = \frac{p_1}{\cosh(2\pi h/L)} \cdots (4)$$

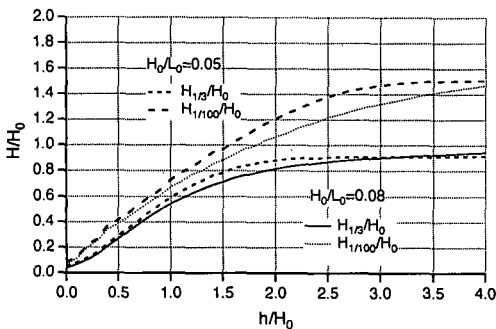


図-3 波高変化

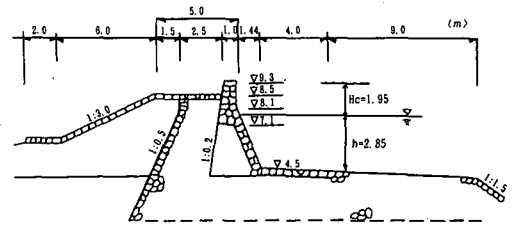


図-4 梅頭海岸堤防の諸元

ただし,

$$\alpha_1 = 0.6 + \frac{1}{2} \left\{ \frac{4\pi h/L}{\sinh(4\pi h/L)} \right\}^2$$

$$\alpha_2 = \min \left\{ \frac{h_b - d \left(\frac{H_{\max}}{d} \right)^2}{3h_b}, \frac{2d}{H_{\max}} \right\}$$

であり, β は堤体壁面に対する垂線と波の主方向のなす角度, w_0 は水の単位体積重量, $H_{\max}$ は堤体壁設置位置での進行波としての波高, d はマウンド被覆工天端上での水深, h_b は堤体の壁面から $5H_{1/3}$ 沖側の地点の水深, L は水深 h での波長であり, $\min\{a, b\}$ は a あるいは b のいずれか小さい値を表す。

波は堤体法線に対して直角に入射するものとし ($\beta=0$), $H_{\max}=H_{1/100}=2$ m として計算する。また, $T=10$ s, $h=2.85$ m に対して $L=51.4$ m と求められ, $h_b=h$, $d=h$ であるので

$\alpha_1 = 0.6 + (1/2)(0.697/\sinh(0.697))^2 = 1.03$, $\alpha_2 = 0$ と算定される。ゆえに,

$$p_1 = (1/2)(2)(1.03)(1.03)(2) = 2.1 \text{ tf/m}^2$$

$$p_2 = 2.1/\cosh(0.348) = 2.0 \text{ tf/m}^2$$

のように求められる。合田式による推定結果によれば, 堤体全面および根固め部分にほぼ同じ波圧が作用していたことが明らかである。なお, 本堤体は背後が陸地部分に接続していて直立部が独立しているような構造ではないので, 転倒や滑動の検討は不要であり, したがって堤体全体に作用する波力の検討も不要である。

(4) 越波流量の推定

梅頭海岸堤防での越波量を以下のような諸量を用いて評価した。沖波波高 $H_0=8.0$ m, 堤脚水深 $h=2.85$ m, 堤防天端高 $H_c=1.95$ m, 海底勾配 $S=1/100$ として周期 T が 8.0 s および 10.0 s の 2 通りについて越波流量を求めると, それぞれ

$$q/\sqrt{2gH_0^3} = 6.4 \times 10^{-4}, \quad q = 0.0644 \text{ (m}^3\text{/sec/m)} (T=8 \text{ s})$$

$$q/\sqrt{2gH_0^3} = 8.6 \times 10^{-4}, \quad q = 0.0867 \text{ (m}^3\text{/sec/m)} (T=10 \text{ s})$$

となる。ただし, この堤防の計画潮位および波高は 20 年確率である。前浜と平行な堤長は 3,945 m であり, かな

りの越波流量が生じたことが伺える。

(5) 海岸堤防決壊要因について

台風17号では、梅頭地区および温州島北部の海岸堤防がともに破堤した。両海岸堤防は、ともにシルト質の土堤の上に石張りをした堤体であるという共通点はあるものの、前者が浅くて1/1000程度の極めて緩い海底断面上に築造されたほぼ直立の前面壁を有する堤体であるのに対して、後者は前面水深が数mの水域に築造された約1/2勾配の前面壁とその上のパラベットを有する堤体という相違点がある。前者はそれまで干潟であったところにエビ養殖のための池を造成するために築造され、完成後、前面の砂浜の侵食が始まったとのことである。したがって、玉井(1995)あるいは高山(1988)も指摘しているように、その被災要因として海岸線に築造された剛な構造物からの反射波の発生が要因となり、①堤防前面の砂浜の消失、②堤脚部の洗掘、そして今回の台風での高潮位時の③越波量と作用波圧の増大、④堤防の破壊に至る、という典型的なプロセスが生じたものと考えられる。このことから、安定している海浜への剛な海岸構造物の築造には十分な注意が必要であることを指摘できる。一方、後者に対しては、当時の風速40 m/secと平均水深5 mから推算される波高は2 m程度であり、また散乱した被覆石の重量(約60 kgf程度)から逆算される波高は1 m程度である。このように、さほど大きな波高とは言えないにもかかわらず、堤体の破壊が生じていることから、被覆石重量や堤体天端高さの設計において、波

の要素が十分に考慮されていなかったことが伺える。今後は波を考慮した堤体の設計が必要であることを指摘することができよう。

4. おわりに

中国は急速に経済開発を行なっている。その歪が昨今の自然災害の多発と激化となって現われていると考えられる。しかも、大気汚染、水質汚濁などの環境問題も無視できなくなっており、災害と環境問題のいずれも規模が大きいだけに、その影響の大きさはわが国のそれとは比べものにならない。とくに沿岸域においては、中央、地方政府の事業と企業の事業、例えば石油施設の建設と維持管理や養魚場新設のための海岸堤防の建設などが入り交じっており、近い将来、海岸侵食を始めとする海岸災害の激化が憂慮される。

なお、洪水と高潮の重畳による氾濫については、今後、洪水の追跡が可能となる資料が整った段階で、高潮と洪水の重畳氾濫シミュレーションを行って検討したい。

参考文献

- 合田良実(1990): 港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版会。
- 高山知司(1988): 沿岸災害の予知と防災, 高橋 博ほか編著, 白亜書房。
- 玉井佐一(1995): ウォーターフロント開発と水環境創造, 樺木亨著, 技報堂出版。
- 間瀬 肇・松本明男・岩垣雄一(1986): 不規則波の浅水・碎波変形計算モデルに関する研究, 土木学会論文集, 第375号/II-6, pp. 221-230。