

水工学シリーズ 08-B-5

日本における沿岸災害の歴史
—高潮・高波災害を中心に—

沿岸技術研究センター 理事

高山 知司

土木学会
水工学委員会・海岸工学委員会

2008 年 8 月

日本における沿岸災害の歴史 —高潮・高波災害を中心にして—

History of Coastal Disasters in Japan —Focusing on disasters caused by storm surges and stormy waves—

高山 知 司
Tomotsuka TAKAYAMA

1. はじめに

単に沿岸災害といってもそれを引起す原因から分類して、いくつかの種類がある。異常な海面上昇によって浸水被害を招くものとして、高潮災害と津波災害がある。高潮は台風のような気象擾乱による気圧低下による吸い上げと強風による吹き寄せによっておこる異常な水位上昇で、常に高波を伴うために、波浪災害もこの中に含まれる。津波は、地震による海底地盤の変形や地すべりといった地殻変動で引き起こされる異常な水位上昇で、地震国であるわが国は過去から多くの津波災害を被っている。また、異常現象で起きるものではないが、毎年徐々に進行する現象として海岸侵食がある。これも沿岸災害といえる。このような自然災害だけではなく、人間活動によって排出される生活汚染物質の流入による沿岸域の水質汚染も沿岸災害に分類されるだろう。しかしながら、地球温暖化による気候変動の影響を最も大きく受ける沿岸災害としては高潮災害であろう。温暖化に伴う海面上昇は、津波災害や海岸侵食災害の規模増大に影響を与えるが、気候変動はそれらにそれほど大きな影響を与えない。そこで、ここでは高波災害も含めて高潮災害について述べる。

わが国の高潮災害は、米国やバングラデッシュとは異なり、外洋に面する海岸ではほとんど起きておらず、多くは東京湾や伊勢湾、大阪湾といった半閉鎖的湾内で起きている。この原因としては、外洋に面するわが国の海岸は比較的勾配が急であることや水深が浅い海岸が広く広がっているのは半閉鎖的な湾しかないことによっている。湾の規模もそれほど大きくはないために、外国とは異なり、高潮の規模としては小さく、3m 程度であるが、湾奥は非常に高密度に利用され、わが国経済の中核ともなっているために、一旦大きな高潮災害が起きるとわが国の経済活動にとって非常に大きな損失となる。津波の来襲高さは高潮の何倍にもなるような場合もあるが、高潮が発生する閉鎖性の湾内では湾口部が狭まっていることもあって湾内の津波は高潮程度にまで低減し、また、津波は一般に高波浪を伴わないので、高潮より被害は小さくなる。

本報告では、高潮の発生とその特徴について述べるとともに、高潮には常に高波が伴い、高波による巨大な波力で防御構造物が破壊され、そこに高潮が進入して大災害を招くことや過去の大きな高潮災害の履歴について述べる。このような高潮災害に対してわが国が行ってきた対策事業について大阪湾を代表にしてその歴史を記述する。そして、地球温暖化に伴う気候変動や海面上昇による影響にも配慮しながらこれからの高潮対策について述べる。

2. 高潮の発生とその特徴

(1) 高潮の発生原因と波形

高潮は、台風のような強風を伴う移動性低気圧によって引き起こされる異常な海面上昇のことである。この海面上昇としては、吸い上げと吹き寄せの2つの要因によって起きる。吸い上げとは、低気圧による気圧低下で海面が上昇する現象である。この現象は水深に関係なく生じ、気圧が1hPa低下すると海面は約1cm上昇する。また、吹き寄せとは、強風によって海面に生じるせん断力で海面が風の吹く方向に上り傾斜することによって起こる海面上昇である。海面に生じる風のせん断力は風速の自乗に比例するために、風速が2倍になれば4倍になり、海面勾配もそれに対応して大きくなる。また、海面勾配は水深が浅くなるほど急になるために、水深の浅い海域が広大になるほど、吹き寄せによる海面上昇は増大する。

高潮は、実際の潮位から推定天文潮を差し引いた潮位偏差で示される。ある地点の潮位偏差は、図-1に示すように台風が比較的遠方にあるときから水位の上昇（前駆波）が始まり、近づくにしたがって急激に高くなり始め、数時間で最大になる。そして、台風が遠ざかるにしたがって、上昇した海面を支える力が消滅するので、水位は急激に低下し、その後は、湾内の固有周期で小さく振動しながら消滅する。前駆波の現象についてはまだ不明の部分が多い。高潮は、図-1に示すように主要な1波だけで成り立っていると考えることができる。ただし、この波形はその地点における海面の変化を示したもので、この波形が伝わって行くようなものではない。この波の峰が満潮と重なると、実際の水位は非常に高くなり、大きな災害が生じる。主要な1波目に続く、2波目が満潮位に重なると、2波目が比較的大きくなる場合も生じる。

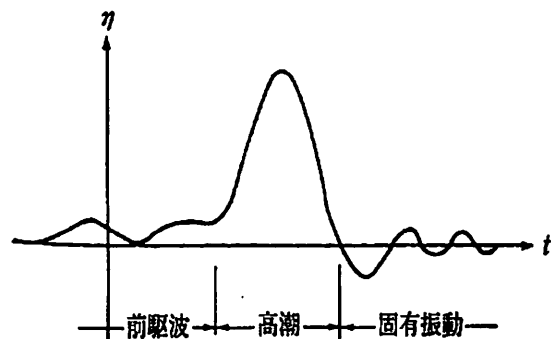


図-1 一般的な高潮の経時変化

940hPaの巨大台風でも、吸い上げによる海面上昇は約70cmであるから、吹き寄せの効果が強くなければ大きな高潮にはならない。吹き寄せの効果が大きくなるためには、広大な浅海が必要である。このような条件を満足する海域としては、わが国では東京湾や伊勢湾、大阪湾、有明海等の湾がある。実際、過去においてこのような湾で大きな高潮が生じている。

(2) 高潮を発生させる台風域内の風

図-2に示すように等気圧線が曲線を描く場合、等気圧線上の点での曲率半径の方向が一般的には低気圧側になる。定常状態の風を考えると、等気圧線上の黒い太線で示した微小長さ部分における力の釣り合いは曲率半径方向だけの力の釣り合いとなり、気圧変化による力は遠心力とコリオリ力とで釣り合うことになる。気圧を p 、等気圧線に沿う風の速度を V_{gr} とすると、この釣り合い式は次式で与えられる。

$$\left(p + \frac{\partial p}{\partial r} \delta r\right) r \delta \theta - p r \delta \theta = \rho_a r \delta \theta \delta r \left(\frac{V_{gr}^2}{r} + f V_{gr} \right)$$

(1)

ここに、 r は等気圧線から求まる曲率半径、 δr と $r \delta \theta$ は微小領域の幅と長さ、 ρ_a は大気密度、 f はコリオリ係数で、次式で与えられる。

$$f = 2\omega \sin \varphi$$

(2)

ここで、 ω は地球の自転角速度、 φ は計算点の緯度である。

式(1)から風速 V_{gr} を求めると

$$V_{gr} = r \left\{ \sqrt{\frac{f^2}{4} + \frac{1}{\rho_a r} \frac{\partial p}{\partial r}} - \frac{f}{2} \right\}$$

(3)

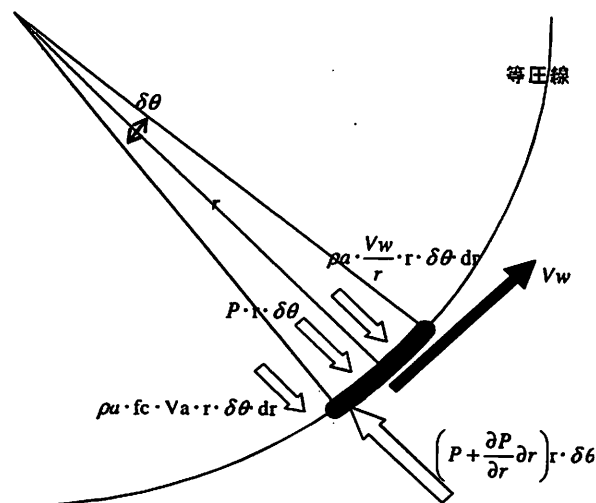


図-2 等圧線上の力の釣り合い

となって、気圧の傾度から求まる風速であるため傾度風と呼ばれている。

台風のように等気圧線が同心円と仮定できる移動性低気圧では、曲率半径は台風中心からの距離になり、気圧分布についてもいくつかのモデルが提案されている。傾度風の方角としては等気圧線に接するように吹くことになるが、実際には海面や地表面の影響を受けて風向は接線方向より少し内側を向いた方向になるとともに、式(2)で計算された風速より小さくなる。海面や地表面から高さ10mの地点では、風向は接線方向より30°程度内側を向いた方向になり、風速の低減は計算された風速の60%程度になることがわかっている。光田・藤井(1985,1986)は台風の移動速度が流跡線の曲率半径へ影響するとし、その影響を調べ、この影響が台風中心付近のスーパグラディエント部分で強く現れることを示している。河合(2003)は実際の高潮の追算においてこの効果を導入して台風域内の風の計算精度を上げている。

さらに、台風のような移動性低気圧では、このような傾度風に加えて低気圧が移動することに伴う場の風が吹く。場の風は、海面や地表面の摩擦によって生じる風速の低減係数 C を導入して、次式の形で表現されている。

$$V_t = CV \exp\left(-\frac{\pi r}{l}\right) \quad (4)$$

ここで、 V は低気圧の移動速度、 l は場の風の分布形状を決める係数で、 $l=500\text{km}$ で与えられる。 C の値としては一般に0.6が用いられている。

場の風は低気圧の移動方向に吹くために、傾度風と重ねると、台風の右側では傾度風と場の風が同じ方向になるために風速が強く、一方、台風の左側では場の風と傾度風が逆の方向になるので風速は弱くなる。以上のことから、台風が対象地点の左側を通るときに大きな高潮が発生することがわかる。

3. 高潮災害の歴史

(1) 過去の高潮災害

わが国において過去に起きた大きな高潮災害の事例を表-1に示す。表-1においては、左の欄から高潮災害を起こした台風名(通称名)、高潮の発生した海域名、発生した潮位から天文潮を差し引いて求めた、高潮の大きさを示す潮位偏差、その台風による死者・行方不明者数、浸水家屋数を示している。1970年に土佐湾で起きた高潮災害を除けばすべての高潮災害が東京湾や伊勢湾、大阪湾、周防灘といった半閉鎖性の湾で起きていることがわかる。土佐湾における高潮は、吸い上げと吹き寄せだけで起こる通常の高潮ではなく、台風によって起こされた高波が沿岸部で砕波することによって生じるウエーブセットアップによる平均水位の上昇量が大きな影響を与えている異常な潮位の上昇であった。外洋に面するわが国の沿岸部は、比較的海底こう配がきつく、そのため、吹き寄せ効果が小さく、大きな高潮は発生しない。土佐湾で起きたような高波の砕波によるウエーブセットアップの効果で海面上昇が大きく現れ、高潮と間違えることもある。以上のように、わが国で起きる大きな高潮災害は半閉鎖的な湾だけで起こる。

1970年の台風10号による高潮災害は上述のように高波災害に近い災害であることからこの災害を除くと、表-1からわかるように、1930年から1960年代前半の期間と1990年から今日までの期間の2つに大きく分けることができる。そして、その中間の1960年から1990年までの期間は高潮による大きな災害は発生していない。つまり、比較的静穏な期間と言えるようである。米国においてもこの期間はハリケーンによる大きな高潮災害が起きなかった静穏な期間であったと聞いている。1960年までの期間は大阪湾や伊勢湾で多くの高潮が発生し、わが国最大の高潮災害を起こした伊勢湾台風もこの期間に発生している。この期間では高潮も2m以上になるものが多い。一方、1990年以降の期間、つまり近年においては周防灘や瀬戸内海で発生する高潮が多く、高潮も2mを超えるものは少ない。さらに、死者・行方不明者数と浸水家屋数は後者の期間に比較して前者の期間が一桁以上小さくなっている。この原因としては、1960年までの期間に大きな高潮が発生していることにもよるが、この期間の高潮災害を教訓として、高潮対策事業が進められ、その結果として近年の高潮では被害が

少なくなっていると考えられる。前者の期間の中でも、第二室戸台風による高潮災害では、同一期間の中の他の高潮災害に比較しても、死者・行方不明者数が非常に少ない。この原因として、第二室戸台風の2年前に伊勢湾台風によってわが国最大の高潮災害が発生し、5000を超える人命が失われたこともあって、高潮の恐ろしさが広く知れ渡っており、第二室戸台風の時には住民がすばやく避難をしたことによっている。そのため、高潮の直接原因で亡くなる人はいなかった。このことは、高潮について正しい知識を教えることとすばやく避難の重要性を示している。

(2) 伊勢湾台風による高潮災害

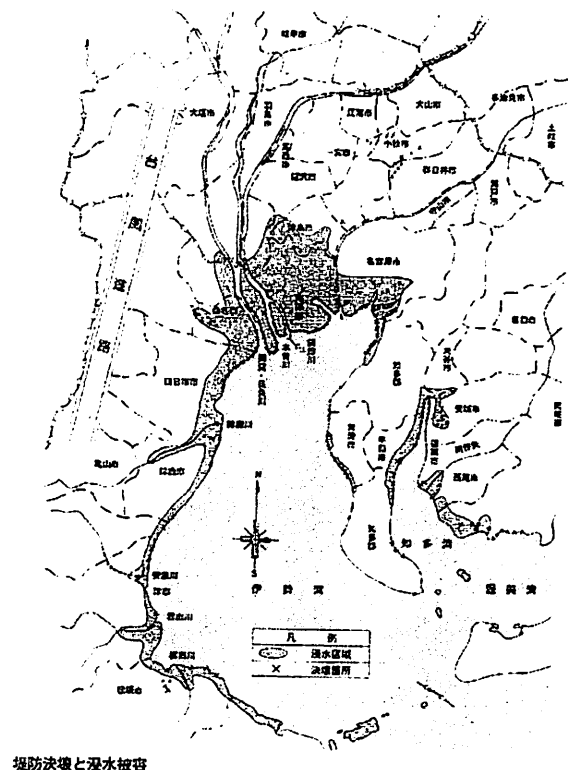
1959年9月26日に中心気圧925hPa、最大風速50m/sで潮岬の西方に上陸し、紀伊半島を北北東に進んだ台風15号は、26日20時から23時の間に伊勢湾全体に未曾有の高潮が発生させた。丁度満潮に近かったために、名古屋港では21時35分にT.P.3.89mの最高潮位を記録し、このときの潮位偏差は3.5mにも達した。また、名古屋港では最低気圧954hPa、最大風速37m/sを記録した。

図-3に台風15号による伊勢湾沿岸における高潮の浸水域を示している。この図に示すように伊勢湾沿岸の全域で浸水しており、湾奥では10数km内陸まで浸水した地域があった。当時、伊勢湾一帯で地盤沈下が進んでおり、異常に大きな高潮であったこともあって、被害を一層大きくした。また、この地盤沈下が防潮堤の機能を弱体化し、越波や越流によって多くの堤防が破壊された。堤内地の水が一カ月も引かず、満潮の度に浸水を繰り返す地域もあった。愛知と三重の両県で4,624人の死者を出したが、そのほとんどが高潮によるものである。

高潮の急激な潮位上昇に対応して海水の陸地への侵入は急激で、名古屋港の臨港部では海水の侵入速度は6~7m/sにも達した。貯木場から流出した木材は海水とともに内陸に侵入し、凶器となって人々を襲い、

表-1 過去に起きた大きな高潮災害

台風の名前	場所	潮位偏差 (cm)	死者と行方不明者数	浸水家屋数
大正6年(1917)	東京湾	230	1,127	302,917
室戸 (1934)	大阪湾	310	3,036	401,157
周防灘 (1942)	周防灘	160	1,158	132,204
枕崎 (1945)	鹿児島湾	>200	3,756	273,888
ジェーン (1950)	大阪湾	240	508	166,605
伊勢湾 (1959)	伊勢湾	345	5,098	363,611
第二室戸 (1961)	大阪湾	241	202	384,120
台風10 (1970)	土佐湾	235	27	59,961
台風18 (1999)	周防灘と八代海	211	31	19,644
台風16 (2004)	瀬戸内海(宇野と高松)	160	17	46,220
台風18 (2004)	瀬戸内海(広島)	180	46	21,086



堤防決壊と浸水被害

図-3 伊勢湾台風時の浸水域

1,000 人以上の人が殺傷されたといわれている。写真-1 は、アパート群になだれ込んだ木材の状況を示している。船舶や木材など、臨港部から流出する漂流物は大きな凶器なることが明らかになった。今日では、このよう漂流物に加え、コンテナヤードに置かれている空コンテナの流出が大きな問題となっている。

伊勢湾沿岸に未曾有の大災害をもたらした、台風 15 号は、伊勢湾台風と呼ばれ、今日では各地域の高潮対策の基準台風ともなっている。

(3) 近年の高潮災害

1959 年の伊勢湾台風で多くの人命が失われて以来、高潮が直接の原因で死者がでることはなかったが、1999 年になって台風 18 号によって熊本県不知火町松合地区で 12 名の住民が高潮による浸水で溺死することが起こった。それ以降、2004 年には台風 16 と 18 号が続けて来襲し、高潮が直接の原因で数名の人命が失われた。ここでは、2004 年の台風 16 と 18 号による高潮災害について述べる。

台風 16 号と台風 18 号の経路を図-4 に示す。台風 16 号は 2004 年 8 月 30 日に九州の鹿児島県に上陸し、九州を縦断し、瀬戸内海から中国地方を横断して日本海に抜けている。瀬戸内海に最も接近したのは 30 日 18:00 でそのときの中心気圧が

970hPa で、台風半径は 160km もあり、台風の影響範囲は非常に大きかった。また、台風の移動速度は 47km/hr であった。一方、台風 18 号は台風 14 号から約 1 週間後の 9 月 7 日九州の長崎県に上陸し、ほぼ台風 16 号の経路と平行して、その約 50km 西側を進んでいった。瀬戸内海に最も接近したのは 7 日 12:00 で、そのときの中心気圧は 945 hPa で、台風半径は 105km と台風 16 号よりかなり小さく、台風中心付近の勢力が大きかった。台風の移動速度は 74km/hr と速く、広島では風速 34m/s の強風が吹いた。瞬間最大風速は広島で 60m/s に達した。

四国の高松における潮位と潮位偏差の変動を図-5 に示している。図中の上の線が潮位変動を示し、下の線が潮位偏差の変動を示している。左の縦軸が TP 上の潮位を示し、右の縦軸が潮位偏差を示している。潮位偏差の最初のピークが台風 16 号によるもので、2 番目のピークが台風 18 号によるものである。台風 16 号の来襲時は潮位の変動が大きく、大潮の時期であることがわかる。大潮の満潮と高潮による潮位偏差のピークが重なり、潮位は T.P.2.44m に達し、既往最高の T.P.1.8m を大きく超



アパート群になだれ込む流木（名鉄大同駅付近）〔中日新聞社提供〕

写真-1 伊勢湾台風時にアパート群になだれ込んだ木材

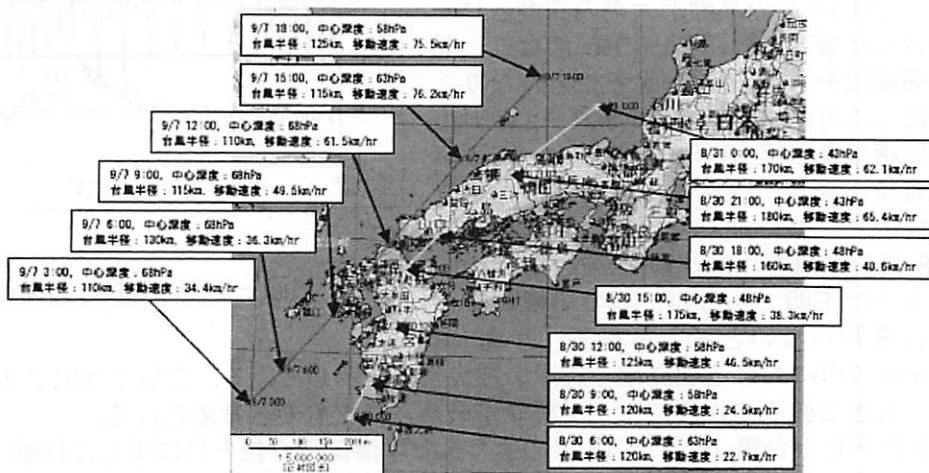


図-4 台風 16 号（右側の実線）と 18 号（左側の実線）の経路

えた。その結果、高松市は広い範囲で浸水し、死者もでた。台風18号のときは小潮で、潮位偏差も台風16号のときより20cm程度小さく、潮位は約50cm低くなった。

広島での潮位観測は途中で欠測になったこともあって、位置的に近い呉の潮位と潮位偏差の変動を図-6に示す。図中の線や軸の条件は図-5と同じである。台風16号の来襲時は図-5の高松の場合と同様に大潮の時期であったが、高潮のピークと大潮の満潮との位相がずれたために、潮位偏差が1.5mあったにもかかわらず、潮位は約T.P.2.7mで、既往の最高潮位T.P.2.8mより小さかった。もし大潮の満潮と重なったとすると、潮位はT.P.3.5m程度になって、既往最高を超え、大災害になったと考えられる。約1週間後の台風18号では、高潮の潮位偏差は1.7mと台風16号より20cm高かったけれども、小潮であったために、潮位はT.P.2.6mと台風16号より小さかった。しかし、台風18号の高潮が大潮の満潮とピークが一致した場合には、T.P.3.7mになり、既往の最高潮位を1m近く超えることになり、大災害になる可能性があった。写真-2は呉市において護岸が台風18号の波浪によって破壊され、背後の民家が大きな損傷を受けた状況を示している。既に述べたように、広島では台風18号の来襲時に潮位観測が欠測になり、その大きさは不明であるが、呉での観測値と大きくは変わらないと考えられる。写真-3は、広島廿日市における埋立地の護岸の被災状況を示している。広島では風が非常に強く、高潮だけではなく大きな波浪の作用によって護岸が破壊されたものと考えられる。

図-4に示した台風16号と18号のように日本海側海岸線とほぼ平行に移動するような台風では、風は瀬戸内海の軸方向に吹き続け、そのために瀬戸内海のどこかの地点では潮位の満潮と高潮のピークが重なる可能性が高くなる。図-5や6に示したように台風16号では高松で、台風18号では呉や広島で潮位のピークと高潮のピークが重なっている。このことから、このような台風経路に対しては注意が必要である。

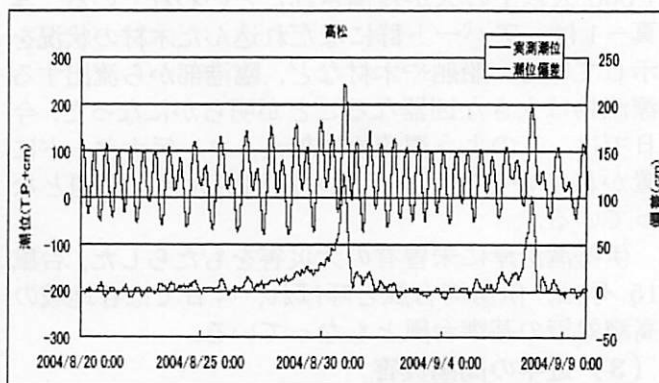


図-5 高松における潮位と潮位偏差

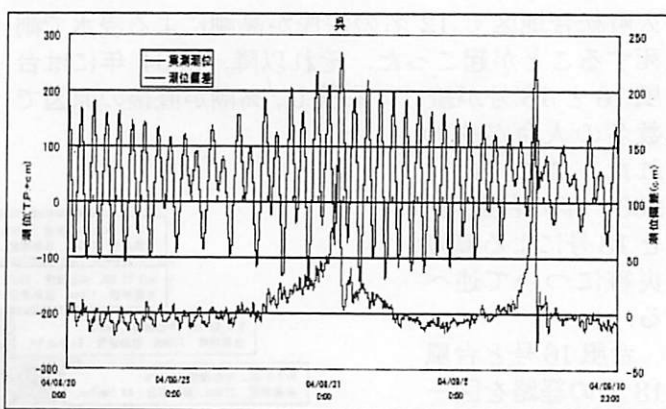


図-6 呉における潮位と潮位偏差



写真-2 呉における護岸破壊による家屋の被害



写真-3 広島廿日市における護岸破壊

(4) 外洋に面した沿岸での災害

高潮は、既に述べたように水深が浅い領域が広く広がっているような内湾で大きくなり、外洋に面したわが国沿岸は海底勾配が比較的きつく、そのため大きな高潮は起きていない。しかしながら、四国南岸に來襲した台風 7010 号は、外洋に面する土佐湾一帯に異常な高潮をもたらし、桂浜で記録した最大の潮位偏差は 225cm にも達した。そのため、宮崎・岡田 (1975) や Ueno (1981)、山下・別宮 (1996) は、この異常な高潮の発生機構を解明するために、数値シミュレーションによってこの高潮の再現を試みた。しかしながら、2m を超えるような潮位偏差を再現することはできなかった。従来の高潮推算では、気圧低下による吸い上げと吹き寄せによる水位上昇のみが考慮されているけれども、それ以外の要素として密度成層、河川流入、wave set-up が考えられる。そこで、柴木・加藤・山田 (2001) はこれらの要素を新たに取り込んだ計算を行っている。密度成層や河川からの流入量については、水深を 3 層に区切り、各層で密度差を与えることによって表している。Wave set-up 量は、3 層の運動方程式に層別のラディエーション応力勾配項を加え、気圧勾配項と表面せん断項を同時に計算して求めている。波の発達・減衰・変形を考慮した浅海波浪推算法 (柴木ら, 1995) によって平面波浪場を計算し、求まった波浪スペクトルから多方向不規則波のラディエーション応力を計算する。波浪変形計算における砕波波高は、合田の砕波限界波高式を用いている。図-7 は、高潮の計算値と実測値とを各地点で比較したものである。図中の実線が計算値であり、黒丸が実験値である。図中の下の図は最大の潮位偏差の分布を示している。各観測点における実験値と計算値の時系列は非常によく一致していることがわかる。また、最大潮位偏差は海岸線近傍で急激に増大しており、ラディエーション応力の影響が強いことがわかる。新たに加えた要素である密度成層、河川流入、wave set-up がそれぞれどの程度潮位偏差に影響しているのか桂浜での観測点で調べたのが図-8 である。河川流入量の影響はほとんどないことがわかった。これは、河川が最大流量になる時刻と高潮が最大になる時刻とが数時間ず

れているためだと考えられる。密度成層の影響は高々 10cm と非常に僅かである。

Wave set-up の効果は単層モデルにおける高潮と同程度である。このことから、外洋に面した沿岸部での高潮には波浪による set-up が大きな影響を与えることがわかる。

このような wave set-up が大きな影響を与えたと考えられる波浪災害としては、1966 年の台風 6626 号による駿河湾での災害や台風 0423 号による室戸岬付近

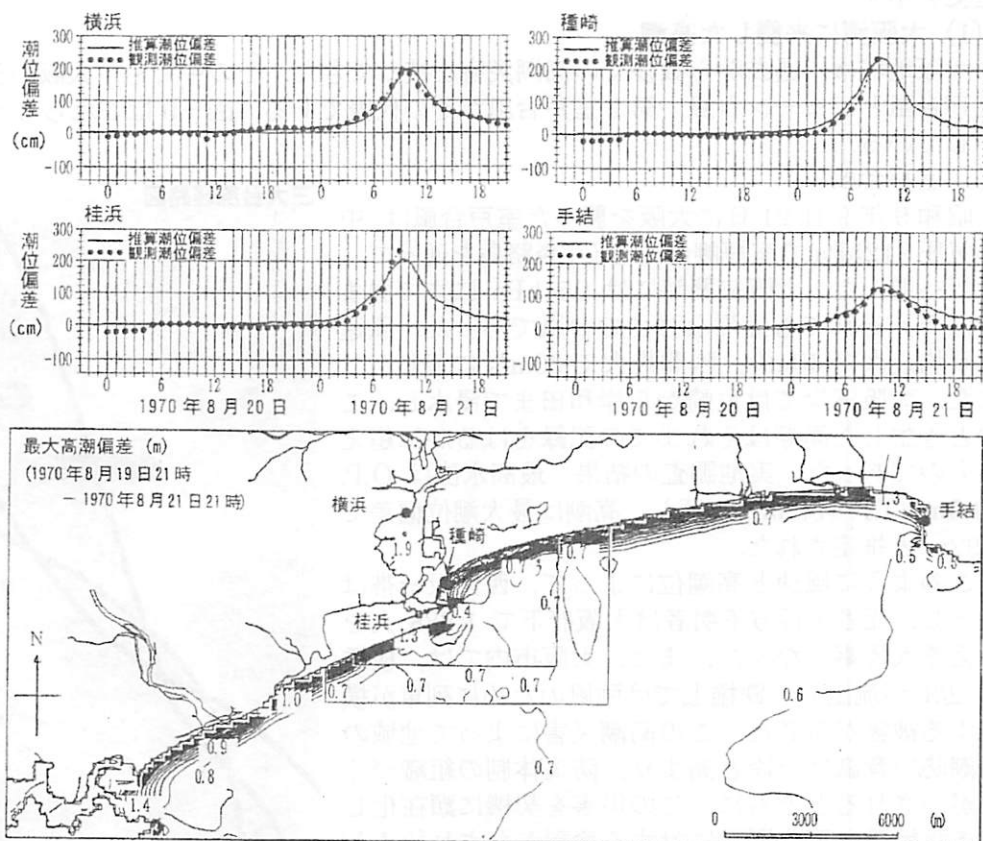


図-7 Wave-Setup を考慮した 3 層モデルによる最大潮位偏差の分布と観測値との比較

の菜生海岸での災害がある。前者の災害では、駿河湾奥の田子の浦港において死者 20 名に及ぶ大惨事になり、その原因として、有義波高が 11m 超え、周期が 16~18s といった周期の長い波が来襲したことで波高が 1m を超え、周期が 80s を超える長周期波が発生していたことも被害を大きくしたと考えられている（富永ら、1967、広瀬・橋本、1983）。後者の災害では、波浪によって破壊された護岸のパラペットが背後地の民家に突入するとともに、この破壊によって急激に増大した越波によって数名が亡くなっている（稲垣ら、2005）。

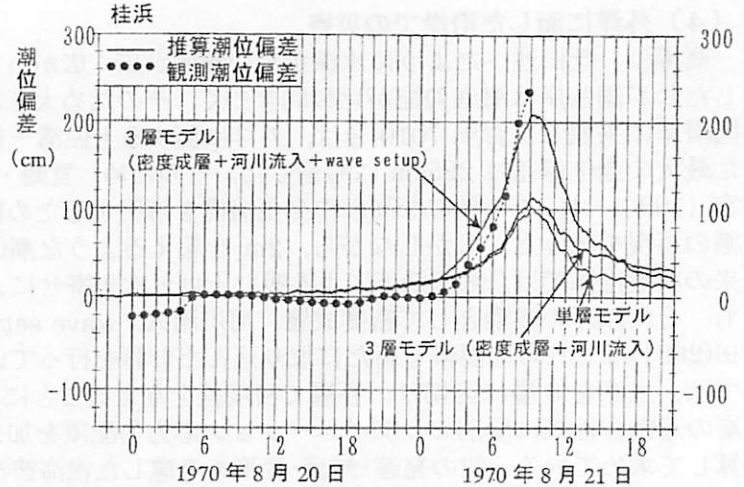


図-8 桂浜における観測潮位偏差の再現性の比較

4. 高潮対策の歴史

わが国における未曾有の高潮災害が 1959 年に伊勢湾に起きてから高潮に対する恒久対策が伊勢湾をはじめとして東京湾や大阪湾に対して立てられるようになった。そして、伊勢湾台風を仮想台風として設計に用いることを基本として対策が立てられ、それが実施されてきて、ほぼ完成段階にある（大阪市港湾局編、1988）。高潮対策事業は伊勢湾台風以前から行われており、大阪湾を代表にしてその歴史を示す。

(1) 大阪湾に來襲した高潮

大阪地域は、過去から数多くの高潮災害を被ってきた。その中でも「大阪の三大台風」と呼ばれる室戸台風とジェーン台風、第 2 室戸台風がその代表である。図-9 はこれら 3 つの台風の移動経路を示している。

1) 室戸台風

昭和 9 年 9 月 21 日に大阪を襲った室戸台風は、中心気圧 912hPa で室戸岬に上陸し、淡路島を通過して、大阪へ進んだ。大阪来襲時には 954hPa にまで弱まったが、それでも猛烈な強さの台風であった。風速は平均最大で 40m/s、瞬間最大で 60m/s に達した。また、大阪湾岸では尼崎から岸和田まで浸水し、このとき生じた高潮はそれまでの記録をはるかに超えるものであった。実地調査の結果、最高水位は O.P. +4.5m (T.P. +3.2m) に達し、高潮は最大潮位偏差で 2.92m と推定された。

このように風速と高潮位によって、西大阪一帯は浸水し、死者・行方不明者は大阪府下で 1,888 人を数える大惨事となった。また、大阪市内では、桟橋の 2/3 が流出し、鉄橋上では強風のために列車が横転する被害が生じた。この高潮災害によって地域の高潮防災意識は一段と高まり、防災体制の組織づくりがなされるとともに、この災害を契機に顕在化してきた地盤沈下の問題に対する検討がなされ始めた。

2) ジェーン台風

戦後の復興計画により徐々に事業を進めてきていたが、昭和 25 年 9 月 3 日に来襲したジェーン台風

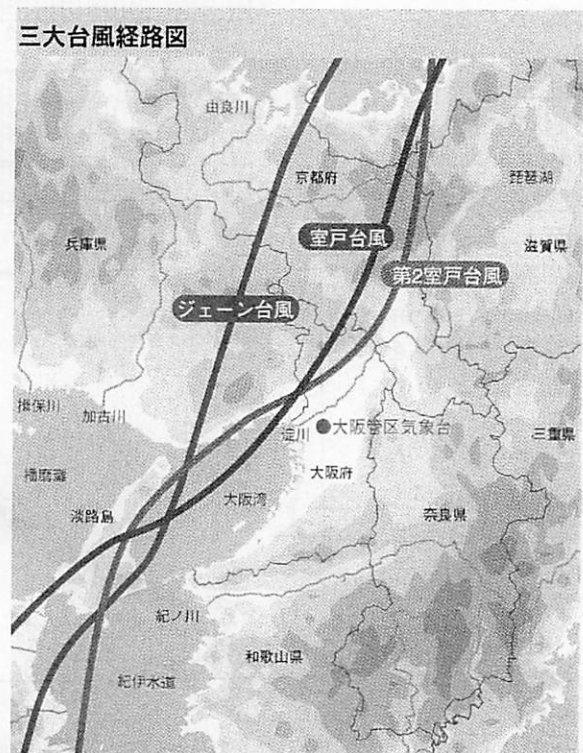


図-9 大阪湾に大きな高潮災害を起こした 3 大台風比較

よって再び大きな高潮被害を受けた。ジェーン台風は、大阪付近において中心気圧 970hPa となり、吹送時間も長く、高潮によって O.P. +3.85m の最高水位が観測され、最大偏差は 2.37m と推測された。風速も平均最大で 28.1m/s、瞬間最大 44.7m/s となった。このような強い風速によって家屋の倒壊や港内船舶の被害も大きかった。図-10 に示すように高潮や越波によって市域の 30% に相当する 56km² に及ぶ地域が浸水した。大阪市では生活物資や水の配給、医療救護、検疫、被害者の収容などに全力をあげたが、排水については 8 日間も要したとの記録がある。

この台風によって得られた教訓の下に、防潮堤や盛土のかさ上げの整備がなされてきたが、図-12 に示すようにこの時代から急激な地盤沈下が進み、昭和 34 年に全域に対し、一応の整備が完了したときには、地盤沈下によって当初計画の天端高より 0.4~0.8m も低い状態になっていた。このような地盤沈下は当時においては全国的に起こっており、伊勢湾台風における名古屋でも既に述べたように地盤沈下による災害の拡大に悩まされている。

3) 第 2 室戸台風

昭和 34 年に伊勢湾台風が起きてから 2 年後に、昭和 9 年の室戸台風とほぼ同じコースを通過して大型の第 2 室戸台風が来襲した。この台風は中心気圧 920hPa で上陸し、大阪付近では 937hPa で、室戸台風とほぼ同じ規模の超大型台風であった。風速は平均最大 33.3m/s、瞬間最大 50.6m/s であり、最高水位は O.P. +4.12m で、最大偏差は 2.45m で、室戸台風より少し小さい高潮であった。

2 年前の伊勢湾台風による名古屋地域の高潮大災害の状況は大阪地域の住民にも伝わっており、いち早く住民は避難し、船舶は港外へ退避した。その結果、高潮による直接の影響で亡くなった人はいなかったし、大阪における船舶被害も皆無に近かった。このことは、事前の情報や避難等の防災活動の有用性が証明されたものである。しかしながら、高潮は、地盤沈下して防波機能が著しく低下した防潮堤を越流あるいは越波して、背後市街を浸水させた。大阪市の浸水域は 31km² にも達し、家屋や港湾施設は大災害を蒙った (図-11)。

(2) 大阪湾の高潮対策事業

1) 復興計画 (昭和 22 年)

室戸台風が来襲した昭和 9 年当時においても大阪臨海地区では既に地盤沈下が起きており、これによって高潮災害が助長された。そこで、地盤沈下を含め、防災に対する対策が進められたが、戦時下に入り対策は非常に不完全なものになった。昭和 19 年や 20 年の台風による高潮で災害を蒙り、以来、防災事業の必要性が論じられ、昭和 22 年に復興計画が

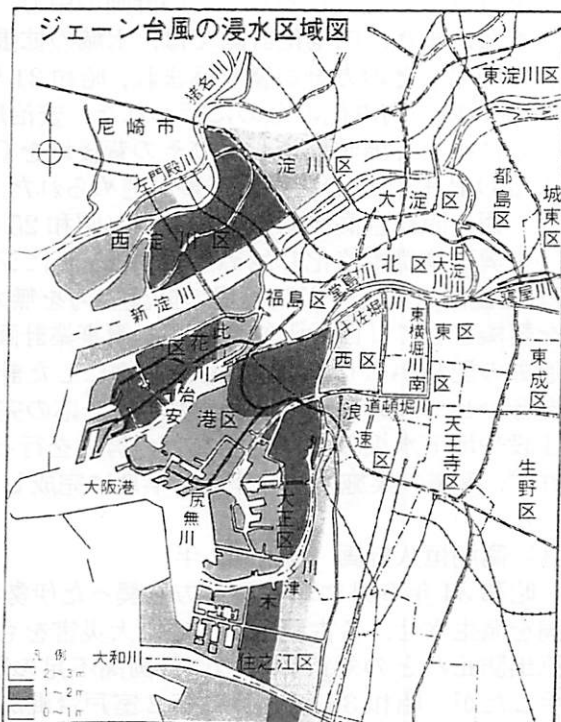


図-10 ジェーン台風による高潮で起きた大阪における浸水域

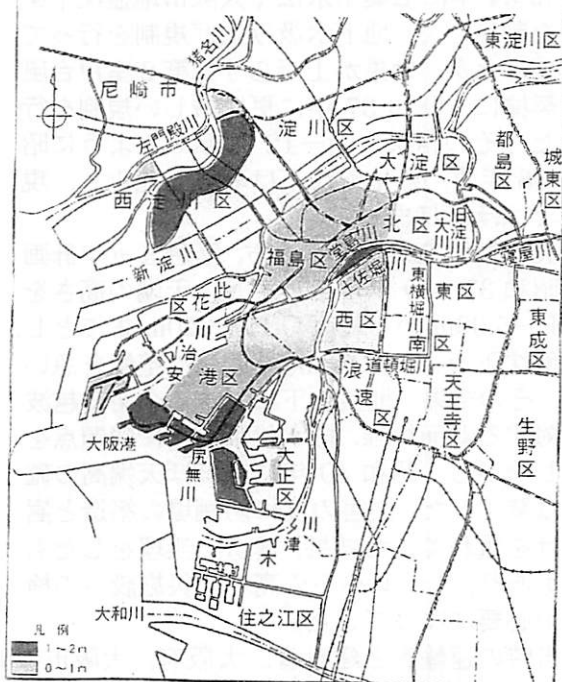


図-11 第2室戸台風による高潮で起きた大阪における浸水域

立案されることになった。この計画の中で、防波堤の新設や内港域の拡張による泊地等の安全化が図られた。また、内港化計画では、水域の拡張において発生する土砂で地盤を盛土かさ上げし、高潮災害を防ぐなどの方針が盛り込まれ、昭和31年までの10ヵ年事業として実施することになった。昭和23年には、内港化のために行われた、安治川と尻無川の下流部拡幅工事で発生した約2,640万 m^3 の土砂によって埠頭地帯およびその背後地をO.P.+3.50m以上に盛り土した。これと平行して、土堤によるO.P.+3.5mの防潮堤工事が進められた。

2) 西大阪総合高潮対策事業計画（昭和25年）

復興事業が本格化し始めた昭和25年にジェーン台風によって大きな被害を被った。ジェーン台風は、地盤沈下の進行が防潮堤の防護能力を無力化してしまうといった大きな教訓を残した。この大災害を契機として「西大阪総合高潮対策事業計画」が策定され、防御高も修正された。防潮堤の天端高は過去の記録からO.P.+5.00mを基準にした計画高に見直された。防潮堤工事は大阪市と府の間で歩調を合わせて進められ、昭和34年に一応の完成を見た。この間、地盤沈下防止のための工業用水道の建設や地下水汲み上げ規制などの努力を行ってきたが、図-12に示すようにその効果はすぐには現れず、事業の実施中も沈下し、早期に完成したものの一部では0.4~0.8mの高さ不足の施設になっていた。

3) 高潮恒久計画（昭和42年）

昭和34年9月に名古屋地方を襲った伊勢湾台風は最高潮位T.P.+3.90mで、最大偏差3.55mの高潮を発生させ、名古屋市を中心に大災害をもたらした。この台風の教訓から、外界波浪の進入や木材流出防止などの対策のために計画高不足の既設防潮堤のかさ上げや貯木池前面の波除堤の築造に着手したが、昭和36年9月に第2室戸台風が事業半ばで不十分な防御体制のところに来襲して、大阪臨海部に3度目の大災害をもたらした。

この第2室戸台風による災害には地盤沈下が悪影響を及ぼした。地盤沈下については、昭和34年に工業用水法や大阪市地盤沈下条例を制定して、地下水汲み上げ規制を行ってきたが、効果が上がらず、第2室戸台風を契機に、昭和37年に更に厳しい規制を行った。その結果、図-12に示したように昭和38年頃から地盤沈下は著しく鈍化し、現在ではほぼ収まっている。

災害復旧工事をを行う一方、緊急3ヵ年計画（昭和37~39年）を策定し、天端の高さをO.P.+5.00mから最高O.P.+6.20mまでとし、地盤沈下を0.3~1.0m見込んで整備を急いだ。その結果、地盤沈下に対する余裕や越波に対する背面補強、排水対策などに問題点を残しながら、昭和40年にはほぼ天端高の確保は終了した。災害の度に防潮堤の築造と嵩上げを重ねてきた結果、構造上無理をしたものもあり、よりレベルの高い防災施設への検討が必要になってきた。

当時の運輸省と建設省、大阪府、大阪市の間で協議を重ね、「恒久的な大阪の総合高潮対策」が検討され、「満潮時の大阪港に最悪の西側コース（室戸台風コース）を通り、既往最大規模の台風（伊勢湾台風）が来襲することを想定し、臨港地区と背後市街地を防護する。」とする基本目標が設定された。防潮堤を高くすることによる港湾機能との調整や用地問題、橋梁の嵩上げによる市街地への影響などが検討され、高潮に対して防潮堤天端高にのみ頼ることには限度があり、各種の試みによって天端高をできるだけ下げ、港湾や都市機能を阻害しない方法が検討された。その結果、水門併用による大ブロック防潮方式を採用することになった。安治川や尻無川、木津川の本流に設置される水門につ

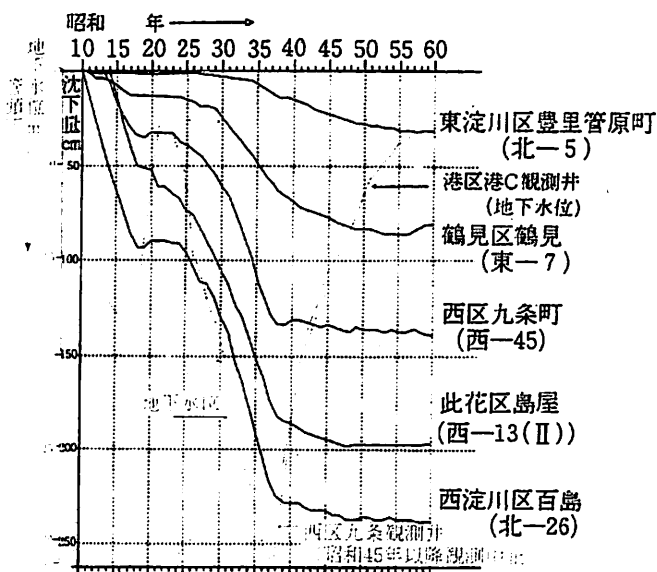


図-12 大阪における地盤沈下の経年変化

いては 300～800 t 級の船舶の出入りを可能にするアーチ型スイングゲート(写真-4)となった。

(3) 高潮恒久整備計画の内容

1) 天端高の設定

防潮堤の計画天端高 H_c は、次式で与えることにしている。

$$H_c = (O.P. + A) + B + C$$

ここに、

H_c : 防潮堤の計画天端高

O.P. : Osaka Peil の略称で基準面

A : 基本潮位

B : 高潮の潮位偏差

C : 波高および河川水門による堰上げ等
基準面 O.P. は東京湾中等潮位 T.P. より 1.3m 低い海面を示している。そして、基本潮位としては台風期(7月～10月)の朔望平均満潮面とし、大阪港天保山検潮所における昭和30年～39年の10年間の実測値の平均値が用いられた。

大阪港の高潮については、いくつか試算したものがあるが、いずれも伊勢湾台風級が室戸台風のコースを通るときが最大の高潮となっており、これらの試算の数値を勘案して、高潮の潮位偏差は 3.00m と定められた。

波浪としては電算機による推算や模型実験によって総合的に判断して決めている。港外波浪としては

WSW 方向 : $H_{1/3} = 3.30\text{m}$, $T_{1/3} = 6.6\text{sec}$

SW 方向 : $H_{1/3} = 3.15\text{m}$, $T_{1/3} = 6.3\text{sec}$

と設定し、大関門から進入し、進入波が直接到達する地区については回折図から波高を決めている。港口からの進入波の他に港内には港内発生波浪が発生する。この波浪については安全側を考慮して全て 1.00m としている。淀川および大和川河口付近は、直接湾内発生波が到達するので、当時の建設省は SMB 法によって推算し、模型実験で打上げ波高を検討し、 $O.P. + 8.10\text{m}$ としている。

堤高としては、飛沫は越えるが少なくとも越波状態が生じない高さとして、本計画では、地形と波向を勘案して入射波高の 1.0 倍あるいは 1.5 倍の高さを用いている。また、河川水門を建設した場合、その下流で高潮が堰き止められ、水門がない場合より高潮が高くなることが懸念され、大阪府はこれについて検討して、遡上・堰上げによる影響を 40cm としている。防潮堤の施工においては地盤沈下量も計画天端高に加えることとしている。このようにして建設された防潮堤は建設後既に 40 年以上経過して、写真-5 に示すように老朽化が進んでおり、新たな防潮堤の建設計画が立案されている。

2) 耐震性

臨港地区は $O.P. + 2.10\text{m}$ 以下の低地盤地帯が多く、防潮堤が崩壊すると大災害になることから、地震に対しても安全な構造にすることを考えて、設計震度は 0.2 を用いている。

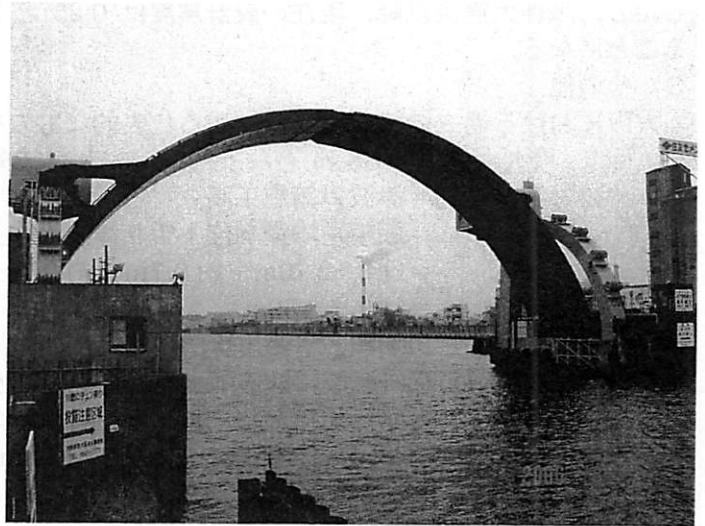


写真-4 安治川のアーチ型水門



写真-5 老朽化した防潮堤

しかし、阪神大震災以降、現在の設計震度は 0.25 となっており、既存の防潮堤は耐震性に問題があることになる。

3) その他

大阪における過去の津波で記録に残る代表的なものを分析した結果、チリ地震津波が他の例を大きく上回り、最大水位上昇 68cm となった。そこで、津波対策計画高として以下のように設定している。

津波対策計画高＝津波対策施工高

＝朔望平均満潮位＋チリ津波水位上昇量＋沈下量も含んだ余裕値

＝O.P.+2.10m＋約 0.7m＋約 0.7m

＝O.P.+3.50m

安治川水門と尻無川水門、木津川水門の建設に伴い、これらの水門内側の防潮堤天端高の検討を行っている。水門閉鎖時に流域に降る雨水を毛馬から排水ポンプにより新淀川へ排水すると、防潮堤の天端高を低くすることが可能である。ジェーン台風時の降雨量から推定すると内水位が 1m 上昇することになるが、余裕高 80cm を加えても O.P.+4.30m であり、この値は水門上流の既設堤防はほぼ O.P.+5m あるので十分であるとしている。

5. これからの高潮対策

(1) 現況の高潮対策の問題点

既に述べてきたように伊勢湾台風による高潮災害を契機として、恒久的な高潮対策が各湾に対して立てられ、実施されてきた。しかしながら、表-1 に示したように近年になっていくつかの高潮災害が発生するようになってきている。恒久的な高潮対策事業が実施されてから約半世紀が経ち、防潮堤の老朽化に対する高潮防御機能の低下が問題になってきている。また、都市化に伴う地下鉄や地下ショッピングセンターといった高度な地下空間の利用によって高潮による浸水災害に対して非常に脆弱な空間が広がってきているとともに、伊勢湾高潮災害のときに問題となった木材の漂流に加えて、近年においてはコンテナによる港湾物流の急速な発展によってヤードに野積みされた空コンテナの漂流が問題になってきている。写真-6 は 2005 年に起きたハリケーン・カトリーナによる高潮災害で、流出したコンテナが民家に突っ込んでいる様子を示している（高橋ら、2006）。さらには、化石燃料の大量消費に伴って生じる炭酸ガスや近代的な工業に欠くことのできないフロンガス等の排出増大に伴って生じる地球温暖化の現象が地球規模の環境変化として大きな問題になってきている。この地球温暖化は、海水の膨張や陸域の氷の融解による海面上昇といった直接的な影響ばかりでなく、グローバルな気候変動を起こすといわれている（IPCC, 2007）。海面上昇は防潮堤の防災機能を低下させるとともに、気候変動の中で台風の規模や発生頻度の変化は高潮の大きさや頻度に関係している。地球シミュレータによる地球環境の変化の計算結果では、今世紀末には 60cm 近くの高潮があるといわれており、また、定性的ではあるが、台風の発生頻度は小さくなるが、台風の規模は大きくなることが推測されている。このように、温暖化に伴う地球環境の変化は高潮災害を大きくする方向に作用する。



写真-6 漂流したコンテナの民家への衝突状況

そこで、本章では、これからの高潮対策において検討しておかなければならない事項について述べる。

(2) 防潮堤の設計

今までの防潮堤の設計においては、4. 高潮対策の歴史で示したように伊勢湾台風を設計台風としてこれから算定される高潮と高波に対して構造的に安全で、浸水が防御するように設計されている。

しかしながら、伊勢湾台風を超えるような台風が来襲しないという保証はない。超過外力の台風が来襲したときにどのような災害が起きているか、近年の高潮災害から見てみる。

防潮堤は、来襲してきた高潮や高波から浸水を防御するために建設される。浸水の防御のためには、設計条件における高潮と波浪に対して防潮堤の天端高が適切に設定される。また、防潮堤の強度についても天端高を決めたと同じ条件で設計される。そのため、設計条件を超える高潮や高波が来襲すると防潮堤は大きく被災することになる。防潮堤が被災して倒壊すると、越波量や越流量は急激に増え、浸水域も急拡大する。図-13は台風18号によって広島島の埋立地の護岸の被災状況を示したものである。護岸の天端は+6.5m あったが、護岸が倒壊することによって1.5m 下がり、地盤と同じ高さになった。高潮のピーク時には潮位はほぼ地盤高近くにまで上昇していた。このときの入射波は有義波高2.8m で、有義波周期6.6s であった。この条件で護岸が壊れないとすると、越波流量は $0.1\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ であったが、護岸が崩壊すると $1.0\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ となって、10 倍の越波流量になったと推定される。このように護岸が倒壊すると、急激に越波量が増え、災害が増大することになる。

防潮堤の倒壊による災害の増大は、2005 年のハリケーン・カトリーナによるニューオーリンズにおける浸水災害においても起こっている。特に、高潮によって増大した潮位が天端をこえる前に運河沿いの防潮堤が倒壊するといった被害も起こり、災害を増大させている。また、増大した潮位が天端を超え、越流した水によって防潮堤背後が洗掘され、それによって防潮堤が倒壊することも起こっている。前者のような防潮堤の倒壊は設計上の問題があるように思われるが、後者の場合は、当初の設計において越流現象が起きることは設計の前提に入っていなかったためにその対策がなされていなかったことによると考えられる。つまり、設計条件以上の高潮についてはなんにも考慮されていなかったと判断できる。そのために、設計条件を超える高潮が発生すると未曾有の大災害に結びつくことになる。

以上述べたように、現行の設計法では、設計条件に対して防潮堤がその機能を発揮すればよく、設計条件以上の外力に対してはなんら配慮していない。設計条件を超える外力に対してどのような災害が発生するのか、それに配慮した設計方法の導入が必要になる。つまり、リスクに配慮した設計法を早急に取り入れることが重要であろう。

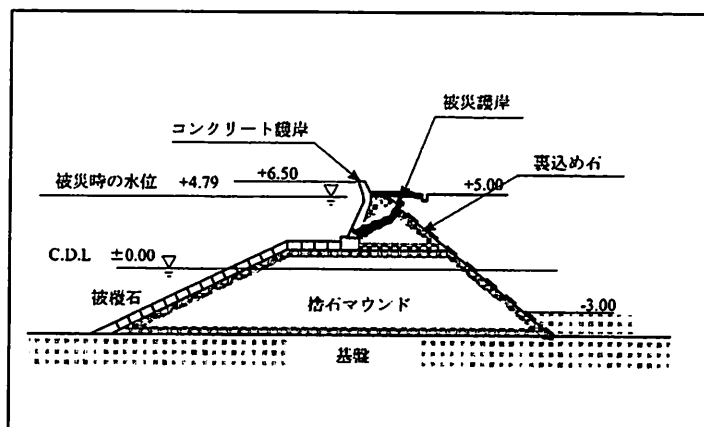


図-13 高潮と波浪によって倒壊した護岸

(3) 地球温暖化に伴う環境変化への対応

化石燃料の大量消費に伴う地球温暖化は、海面の変化ばかりでなく、気候変動を起こし、台風の規模や発生頻度を大きく変化させることは間違い。これらの変化は、高潮災害を軽減する方向に作用するのではなく、逆に災害を増大させる方向に作用することがわかってきている。海面の上昇は、過去の地盤沈下と同様に防潮堤の天端高を小さく見積もることになり、防潮堤の防災機能は低減する。さらに、台風規模の増大は高潮や波浪を巨大化させ、防潮堤の安定性を低下させるとともに、防災能力を低減させる。このようなことが起きるのはほぼ確実であり、これに対する対処法を検討しておかなければならない。

最初にはしなければならないことは、地球環境の変化を精度高く、定量的に推定することである。しかしながら、技術の進歩が十分でなく高精度な算定ができていない。そこで、技術の進歩は常に図るとともに、不確かな要素による影響を含んだ状態で定量化を量ることが重要である。たとえば、台風規模、つまり台風中心気圧深度が20%大きくなることが予測されたなら、その値が不確定な要素を含んでいても当面はその値を用い、将来この値が修正されれば、そのときに修正すればよい。そして、将来の高潮の規模や来襲波浪の大きさを推定し、それに対して既存の防波堤の防災機能や構造的な安全性を検討し、必要なら、防災機能や構造を強化する方策を検討することになる。現状で新たに防潮堤を建設するのであれば、将来の補強を考慮した設計を行っておくことが重要となる。

6. おわりに

わが国沿岸災害、特に高潮災害を中心にして、高潮の発生メカニズムや過去の高潮災害事例から災害の特徴を述べるとともに、大阪湾を対象にして過去のわが国における高潮対策事業の歴史について述べた。1959年の伊勢湾台風による未曾有の高潮災害以前においても高潮対策は採られていたが、地下水の汲み上げに伴う地盤沈下で高潮対策として建設した防潮堤の天端が下がり、その機能は失われていった。地下水の汲み上げ規制が十分に効果を発揮しなかったのは、工業用水の供給が工業の発展に追いついてゆけなかったことが大きな原因である。伊勢湾台風による高潮災害を契機として、全面的な地下水汲み上げ規制が行われ、防潮堤の機能低下は収まった。しかし、今度は逆に地球温暖化による海面上昇で防潮堤の機能が失われそうになってきている。条件は異なるが、過去に起きた防潮堤の機能低下が将来的に起きることになる。これは、過去の地盤沈下は一地域の問題であったが、温暖化によって起きる海面上昇は地球規模の問題であり、その影響は計り知れない。さらに地球の温暖化は台風の規模を増大させることが定性的に明らかになってきており、外力の増大といったことが加わり、ダブルパンチを受けることになる。

地球温暖化の影響については上述の問題だけではなく、生態系や海流にも影響するが、すべてのことが定性的であってもわかっているわけではない。われわれにとって未知の現象がいろいろな現象と絡み合って起きる可能性があり、そのような現象が高潮の防御対策に対して悪い影響を及ぼすかもわからない。いろいろな観点からの研究にアンテナを張っておき、沿岸災害に大きな影響を与えると考えられる現象が見出されたなら、それに対する対策を検討することが重要であろう。これからの研究に期待するものである。

参考文献

- 稲垣茂樹・加藤史訓・福濱方哉・柴木秀之(2005): 台風 0423 号来襲時の室戸岬周辺における高潮の特性, 海岸工学論文集, 第 52 巻, pp. 231-235.
- 大阪市港湾局編(1988): 高潮とのたたかい 大阪港の防災事業, 50p.
- 河合弘泰・川口浩二・橋本典明(2003): 台風による内湾の波浪・高潮の双方向結合推算モデルの構築と台風 9918 号を例とした追算海岸工学論文集, 第 50 巻, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp. 296-300.
- 柴木秀之・加藤史訓・山田浩次(2001): 密度成層と Wave Setup を考慮した土佐湾異常高潮の推算, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp. 286-290.
- 高橋重雄・河合弘泰・平石哲也・小田勝也・高山知司(2006): ハリケーン・カトリーナの高潮災害の特徴とワーストケースシナリオ, 海岸工学論文集, 第 53 巻, pp. 411-415.
- 富永康照・橋本宏・中村隆(1967): 台風 26 号による吉原海岸の災害について, 第 14 回海岸工学講演会講演集, pp. 206-213.
- 広瀬宗一・橋本典明(1983): 田子のうらにおける長周期波の特性, 第 30 回海岸工学講演会論文集, pp. 163-167.
- 光田 寧・藤井 健(1985): 日本本土に來襲する台風の統計的性質について, 京都大防災研究所年報, 第 28 号 B-1, pp. 463-473.
- 光田 寧・藤井 健(1986): 台風の確率モデルの作成とそれによる強風の, 京都大防災研究所年報, 第 28 号 B-1, pp. 229-239.
- 山下隆男・別宮 功(1996): 台風 7010 号の土佐湾における高潮の追算, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 261-265.
- IPCC(2007): Summary for Policymakers, A Report of Working Group I, 980p.
- Ueno, T. (1981): Numerical computations of the storm surge in Tosa Bay, J. Oceanogr. Soc. Japan, Vol. 37, pp. 61-73.