

1. はじめに

近年、台風等の気象擾乱が無いにもかかわらず、天文潮を数十cmも上回るような高潮位による被害が発生しており、このような現象は「異常潮位」としてその存在が知られている。平成13年(2001年)9月～10月にかけては、東海から九州の太平洋沿岸で異常潮位が観測され、豊後水道と紀伊水道を通じて太平洋の影響を受ける瀬戸内海においても同様に異常潮位が確認された。特に、広島湾にある世界遺産“厳島神社”では、平成13年9月18～19日の満潮時間前後に回廊が冠水し、拝観停止になるなど、マスコミにも取り上げられる事態となった。平成14年8月には沖縄の泊漁港において、岸壁が冠水する被害も発生している。

このような経緯から国土交通省は、平成13年に「異常潮位検討委員会」(委員長:磯部雅彦東京大学教授)を設置した。委員会では、異常潮位の発生実態の把握、要因分析、予測手法、港湾・海岸施設への影響評価と対策策定等について調査、検討が行われた。平成13年度、14年度の調査では、報道記事などからの異常潮位の発生実態の整理、モデル地点での潮位偏差の発生要因解析、地盤変動と水位変動の分離が試みられ、成果の一部はマスコミにも公表された。特に、前述した広島湾での異常潮位現象に関しては詳細な発生原因の分析が行われており(末永ら, 2003)、陸棚波、黒潮の蛇行・接岸、北西太平洋振動の影響などがその主要因であることを見出している。平成15年度の調査では、要因分析WG(座長:柳哲雄九州大学教授)によって、解析対象地点を全国に広げた異常潮位の発生実態の把握、地盤変動解析が行われた(下野ら, 2004)。さらに、影響検討WG(座長:鶴谷広一東海大学教授)によって、異常潮位による影響度の把握と対策の必要性、対応方針について課題の整理が行われた。平成15年度の成果は、「異常潮位検討調査報告書」(広島港湾空港技術調査事務所, 2004)にまとめられている。平成16年度の調査では、負の異常潮位の出現特性把握、気象擾乱と異常潮位の同時生起性の把握が行われ、さらに「異常潮位の手引き書(仮称)」作成に向けた検討が現在、実施されている。

しかしながら、これまでの検討において、港湾・海岸施設に対する異常潮位の影響については、概ね定性的な評価に留まっていた。影響検討WGによって、防波堤の安定、消波工の安定、堤防・護岸の打ち上げ高、護岸の越波量に関する定量評価が実施されているものの、それらは、設計潮位を仮想に増加させた場合の安全率の低下や必要重量の増加、打ち上げ高の上昇および越波量の増

加を評価したものであった。このような確定論的な検討方法では、異常潮位という文字通り不確実性の高い現象の影響を定量評価したとは言い難い。異常潮位という不確実性下にあつては、確率・統計手法に基づく信頼性評価を行う必要がある。

信頼性設計法は、限界状態関数(性能関数)に基づく確率論によって安全性の定量評価を行う方法であり、土木および建築構造物に関する国際規格であるISO2394(構造物の信頼性に関する一般原則)の中で明確に位置づけられている。WTOに加盟しているわが国としても、この国際規格に対する整合を図るべく、信頼性設計法の適用が望まれている(国土交通省, 2002)。また、信頼性理論によって安全性を正しく定量評価するためには、設計に介在する様々な不確定要因の確率分布を適切に定める必要がある。

以上の背景のもと、本研究では、統計解析により異常潮位の発生確率分布を評価するとともに、異常潮位現象が港湾施設に及ぼす影響を信頼性理論に基づき明らかにすることを目的とする。検討対象は、わが国の代表的外郭施設であるケーソン式防波堤の外的安定問題(滑動、転倒)とする。本研究の検討フローを図-1に示す。まず、2.では、本研究における異常潮位の定義を明確にするるとともに、その算出方法について概説する。3.では、全国の長期間にわたる潮位観測データに基づき、異常潮位の発生確率分布を定めた結果について述べる。さらに、異常潮位の地域特性および経年変化特性について、確率統計的観点から考察する。4.では、信頼性理論の概要について述べる。特に、一次信頼性理論に基づく信頼性指標と感度係数について詳述する。5.では、全国のケーソン式防波堤の建設事例を対象に、滑動および転倒に関する

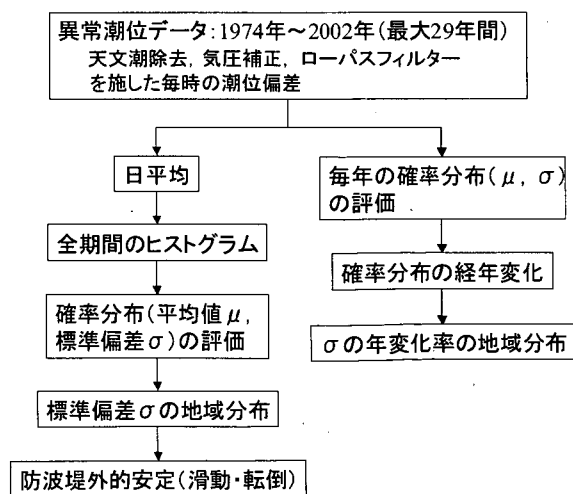


図-1 検討フロー

信頼性指標 β を算出し、異常潮位の考慮の有無によって β がどのように変化するかを明らかにする。なお、防波堤の外的安定問題には、滑動、転倒安定性の他に、捨石マウンドの支持力安定性の問題がある。異常潮位の発生による水位の上昇は、堤体に作用する浮力を増加させ、堤体の有効重量を減少させることから、滑動および転倒安定性の低下を招くと考えられる。しかしながら、支持力については、堤体有効重量の減少はマウンドに作用する上載荷重の偏心量を増加させる一方で、総鉛直荷重を低下させるため、その影響は相殺され小さくなるものと考えられる。したがって本研究では、支持力安定性への影響を考慮しないこととする。

2. 異常潮位の定義と算出方法

2.1 観測データの概要

本研究では、下野ら（2004）が収集した全国128箇所の実測潮位データの中から、観測期間が10年以上あり欠測期間の少ない97箇所のデータを対象とする。検潮所の位置を図-2に、観測期間を表-1に示す。特に、神津島、三宅島、八丈島、父島については、その出現特性が本州と大きく異なるため対象外とした。観測期間は、最大で1974年から2002年までの29年間であり、対象検潮所の各機関別の所有数は、気象庁が51地点、国土地理院が23地点、海上保安庁が22地点、国土交通省地方整備局が1地点となっている。



図-2 検潮所の位置

表-1 各検潮所の観測期間(2)

		74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	00	01	02
地理院	52 油壺	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	53 細島	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	54 輪島	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	55 忍路	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	56 海南	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	57 浅虫	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	58 鼠ヶ関	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	59 柏崎	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	60 鬼崎	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	61 田後	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	62 勝浦	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	63 三国	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	64 久礼	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	65 男鹿	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	66 阿久根	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	67 須佐	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	68 仮屋	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	69 相馬	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	70 伊東	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	71 小木	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	72 沖縄		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	73 田子			●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	74 焼津				●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	奥尻																													
飛島																														
海洋情報部	75 紋別	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
	76 浦河	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
	77 室蘭	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
	78 大湊	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
	79 釜石	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
	80 千葉	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
	81 芝浦	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
	82 横須賀	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
	神津島	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
	三宅島	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
	八丈島	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
	83 南伊豆	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
	84 呉	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
	85 広島	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
	86 徳山	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
	87 大分	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
	88 門司	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
	89 博多	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
	90 佐世保	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
	91 大泊	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
92 西之表	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●		
93 名瀬	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●		
94 厳原	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●		
95 舞鶴	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●		
96 粟島	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●		
吉岡																														
竜飛																														
中之島																														
横浜新港	●	●	●																											
地方整備局等	97 久里浜	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●		
	志布志																													
	唐津																													
	中城湾																													
	金沢																													
	七尾																													
	新潟西																													
酒田																														

※網掛部：検討対象外とした検潮所

2.2 定義

異常潮位という現象は、その発生原因が十分明らかにされていないため、その定義についても、偏差絶対値、発生領域、継続時間、発生頻度等についての明確な定義があるわけではない。気象庁が平成13年9月14日に公表した報道発表資料（付録A）では、その定義を、「高潮や津波以外の原因により、潮位偏差の高い（または低い）状態が広範囲で比較的長時間続く現象」としている。海上保安庁海洋情報部のホームページでは、「沿岸の海水面が、明確な原因（潮汐・津波・高潮等）でなしに異常に昇降する現象」と定義している。港湾の施設の技術上の基準（運輸省港湾局監修，1999）では、明確な定義は示されていないものの、「港湾の施設の構造の設定及び安定の検討に用いる潮位は、天文潮及び気象潮並びに津波等による異常潮位の実測値又は推算値に基づいて定めるものとする。」としている。さらに、高潮の定義として、「気象潮の1つである高潮の呼称は、台風などの通過によって生じる異常潮位に用い、…」とある。つまり、港湾基準では、異常潮位の中に高潮・津波による潮位偏差を含めているものと考えられる。異常潮位検討委員会においては、その検討目的から気象庁の定義を採用しており、異常潮位に高潮・津波を含めないこととしているため、本研究もこれに従う。また、天文潮、高潮・津波以外の水位変動現象のうち、高い水位上昇のみを異常潮位と呼ぶのではなく、次節で述べるように、正負を含めた長周期の潮位偏差全てを「異常潮位」と定義する。

以上の定義により、潮位現象を“天文潮”，“高潮・津波”，“その他の水位変動要因”の3つに分けて考える（図-3）。“天文潮”は変動波形およびその振幅とも精度良く予測可能で、秋の大潮の満潮時に最も水位が高くなる。“高潮・津波”は、発生規模の予想は困難であるが、そのメカニズムは学術的に説明されていて、気象擾乱や断層の規模が与えられれば定量的な解析も可能である。そして、“その他の水位変動要因”となる黒潮、陸棚波、暖水塊・渦、気圧、風などは、ある程度学術的に説明されているものの、複数要因の同時生起性については未解明の部分が残されており、定量的な評価は難しい。これらが異常潮位現象と密接に関係している。なお、“高潮・津波”は、単一の現象のみの発生により災害を起こし得るが、“天文潮”や“その他の水位変動要因”は、それぞれ単独の現象のみで、災害が発生する可能性は極めて低い。

一般的に異常潮位と呼ばれるのは図の①の部分であり、気象擾乱が無いにもかかわらず、秋の大潮の満潮時刻前後にいくつかの水位上昇要因が重なることによって冠水

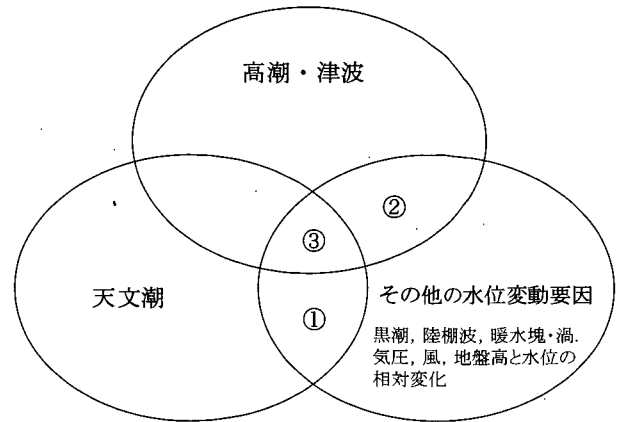


図-3 異常潮位問題発生概念図

などの被害が発生する。そして、最も懸念されているのが、単独でも災害を起こし得る“高潮・津波”と、“その他の水位変動要因”による顕著な水位上昇が同時に発生した場合（図中の②，③）であり、甚大な被害の発生が予想される。

2.3 算出方法

異常潮位の算出方法は以下の通りである。詳細は、下野ら（2004）を参照されたい。

- ① 各年の毎時の実測潮位データを用いて調和解析を行う（60分潮）。
- ② この結果を用いて毎時の推算潮位を計算する。ただし、推算潮位の計算に用いる調和定数は、当該年を含み、9年間遡った合計10年間のベクトル平均値を用いる（平均潮位は当該年のもの）。ベクトル平均には測得率が50%以上の年だけを用いる。また、測得率が50%以下の年の平均潮位は、その前後年の平均潮位の平均値とする。観測期間が10年に満たない地点は解析対象外とする。
- ③ 毎時の実測潮位から推算潮位を引いて、潮位偏差を求める。
- ④ 毎時の潮位偏差に気圧補正を行った後、ローパスフィルターを施して異常潮位とする。気圧補正とは、現在の気圧から後述する基準気圧を引いたものを、1hPaを1cmと換算して、潮位偏差に加える処理である。気圧補正を行う理由は、気圧変動に伴う潮位変動は原因が明らかであるため、気圧変動によらない成分のみを異常潮位とした方が、その特性をよく捉えられると判断されたからである。

本研究では、このように算出された毎時の時系列を「異常潮位」と呼ぶことにする。したがって、異常潮位は正

負いずれの値を取ることもできる。特に、異常潮位の閾値を±10cmとし、+10cm以上を「高い異常潮位」、-10cm以下を「低い異常潮位」と呼んで、「異常潮位」とは区別する。

(1) 気圧補正の方法

気圧補正には、通常1,010hPa, 1,013hPa等の一定値や、地点毎に年平均気圧を基準気圧として用いることが多いが、ここでは、季節変動を考慮した気圧を基準気圧としている。基準気圧とは、現在の気圧との差を水位に換算して潮位偏差の補正を行い、気象擾乱の影響を除去するものであるため、季節的な変動を含んだ平常時（気象擾乱が来ていない時という意味）の気圧をとるのが適切だからである。また、調和解析の対象となる分潮で、1日より周期の長い成分には、1年、半年、1ヶ月、半月等の成分があり、推算潮位にはこれらの周期変動が反映されている。気圧変動のうち、1年～半月の周期を持つ変動は、潮位の変動と関連していると考えるのが自然なので、基準気圧も半月程度以上の周期変動を含んだものを採用するのが良いと考えられる。

(2) ローパスフィルターの選定

気圧補正を施すことによって、気圧変動に伴う潮位変動の影響を静力学的に除去したが、風による吹き寄せ、波浪による水位上昇等の効果は除去することができない。そこで気象擾乱に相当する時間規模を決定し、それ以下の周期成分を除去することにより、潮位偏差から気象擾乱の影響を除くこととした。

フィルターの遮断周波数は、潮位偏差の周波数特性を調べることによって決定している。広島の解析結果例を図-4に示す。解析に用いたデータは、毎時の潮位偏差に前述した気圧補正を施したものであり、データ期間は、2002年7月1日0時から2048データ（85.3日）である。短周期（高周波）側では、25時間（周波数0.04/h）、12.5時間（周波数0.08/h）および数時間にピークが見られ、長周期（低周波）側では、数日にピークが見られるが位置は一定していない。気象擾乱による影響を除くためには、2日程度以下の成分を遮断する必要がある。また、松永ら（2003）が解析した陸棚波と思われる数日程度の時間規模を持つ変動は残す必要がある。以上のことから、遮断周期を48時間としたローパスフィルターが選定され、ローパスフィルターには花輪（1985）の提案する48tkが用いられている。

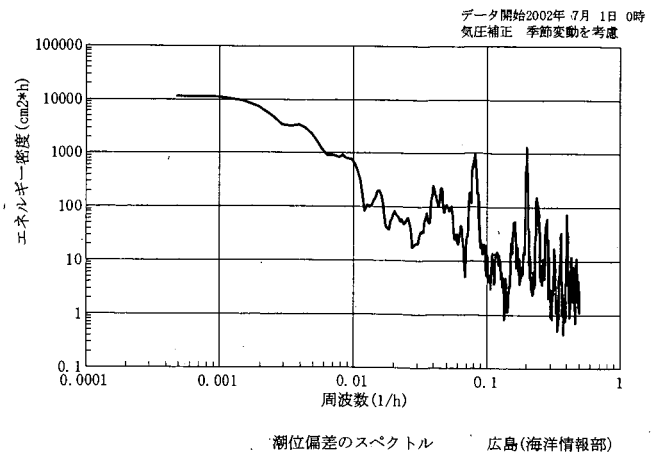


図-4 偏差のスペクトル解析結果（2002年，広島）

3. 異常潮位の発生確率分布

3.1 確率分布の評価

本章では、信頼性解析を行うにあたって必要となる異常潮位の発生確率分布を評価する。確率分布の評価に際し、29年間の毎時データをそのまま用いるのではデータ容量が膨大となるため、まず、これを日平均のデータとした。算出した異常潮位の経日変化を図-B.1～17に示す。図より、異常潮位の振幅および卓越周期は、観測地点によって大きく異なっていることがわかる。

図-C.1～17は、これを用いて算出した各観測地点の異常潮位のヒストグラムである。図より、異常潮位の度数分布形状は、観測地点によって大きく異なっていることがわかる。図の実線は、これを正規分布に仮定した場合の分布曲線を表している。これより、異常潮位の従う確率分布は、どの観測地点も正規分布に良く一致することがわかる。「異常潮位」というと、天文潮に対して正の偏差が問題視される場合が多いが、本解析結果により、異常潮位は正にも負にも同様の確率で発生し得ることがわかる。また、その標準偏差は観測地点によって有意な差が見られるが、平均値はいずれの地点も概ねゼロとなっている。近年、地球温暖化に伴う平均海面の上昇が懸念されており、例えば永井（1996）は、1958年から1995年迄の約38年間における久里浜湾の年平均潮位が、推定値+2.03mm/年で上昇していることを報告している。しかしながら、本研究で用いた異常潮位データには、このような平均海面の上昇が捉えられていない。これは、2.3で述べたように、各年の実測潮位データを用いて調和解析を実施し、その推算潮位を差し引いているため、その平均値に平均海面の上昇分が取り除かれているものと考えられる。

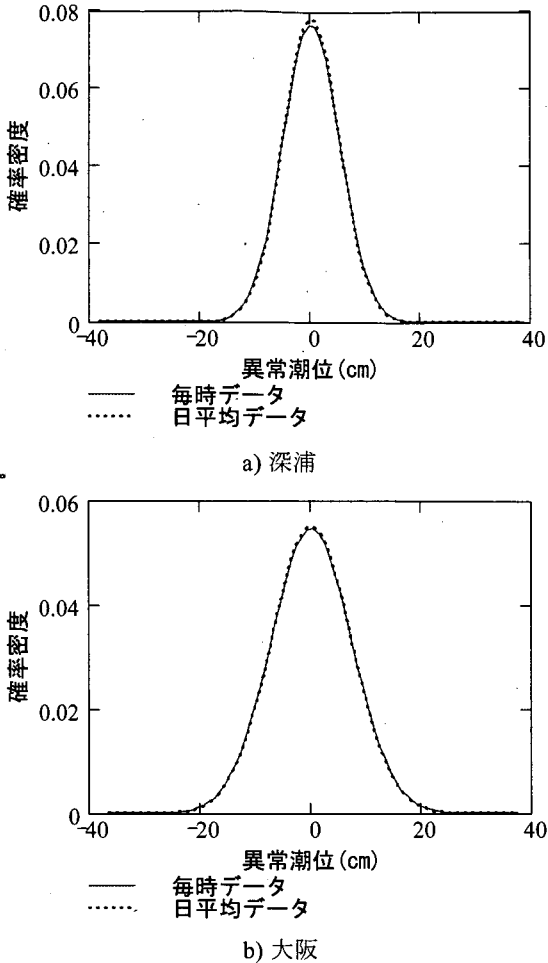


図-5 確率密度の比較

また、図-5は、毎時データと日平均データを用いて正規分布に近似した場合の確率密度を比較したものである。両者の確率密度曲線は良く一致しており、日平均データによって確率分布を評価しても問題ないことがわかる。

3.2 確率分布の地域特性

前節で評価した異常潮位の確率分布形に、どのような地域特性が見られるかについて検討する。図-6は、異常潮位を正規分布で近似した際の標準偏差 σ の地域分布である。これを見ると、明確な地域特性は見られないものの、北海道から東北の太平洋側では標準偏差がやや小さいことがわかる。日本海側および九州、沖縄に関しては、標準偏差はほぼ同程度であり、関東～九州西部にかけての太平洋側では、標準偏差はやや大きくなっている。前節で述べたように、異常潮位の平均値についてはいずれの観測地点も概ねゼロとなっているから、標準偏差の大きさは、「高い異常潮位」の発生確率（+10cm超過確率）と等価であると考えてよい。図-7は、異常潮位の既往最大値の地域分布である。傾向としては、図-6の標準偏差

の地域分布と一致しているが、相違点として、日本海側の最大偏差がやや高い点が挙げられる。これは、図-Bに示した異常潮位の経日変化（例えば、No.65 男鹿）に見られるように、日本海側の観測地点においては標準的な異常潮位は小さいものの、突発的に高い異常潮位が発生していることを意味する。以上のことから、本研究で得られた異常潮位の出現特性についてまとめると、以下の通りとなる。

- ① 北海道から東北の太平洋側では「高い異常潮位」の発生確率は低い。
- ② 関東～九州西部にかけての太平洋側では発生確率がやや高い。
- ③ その他の海域については、発生確率は中規模であるが、特に日本海側については、高い異常潮位が発生する可能性があるので注意する必要がある。

下野ら（2004）は、同一の異常潮位データを用い、「高い異常潮位」の出現特性解析を行っている。その結果、「高い異常潮位」の出現回数、継続時間および偏差（異常潮位の大きさ）に関して、以下のようにまとめている。

- ① 日本海側では、継続時間の短い異常潮位が数多く発生している。
- ② 北海道、東北太平洋側では、出現回数が少ない上に継続時間も短く、偏差の大きさも小さい。このことから、これらの海域は異常潮位があまり発達しない海域である。
- ③ 南西諸島では出現回数が少なく、偏差も小さいが、継続時間が非常に長い。
- ④ 東北太平洋側と房総半島太平洋側は隣接しているが、後者の方が前者よりも出現回数が不連続に多く、偏差も後者の方が不連続的に大きい。このことから、両海域の間で、海況が大きく変わっていることが示唆される。

本研究は、確率統計的観点からの異常潮位の出現特性評価であり、出現回数、継続時間という点で検討方法が異なっているが、得られた結果は、下野ら（2004）の評価結果と良く整合しているものと考えられる。

以上の検討より、異常潮位の発生確率分布の、全国97地点の統計をまとめると表-2となる。異常潮位の平均値 μ は、全国的に見ても概ねゼロとなっている。標準偏差 σ は、全国平均で約6cm、全国最大で約9cmであり、これら μ 、 σ を用いて次章に示す信頼性評価を実施する。また、表には、得られた μ 、 σ より算出した「高い」もしくは「低い」異常潮位の発生確率（+10cmを上回るまたは-10cmを下回る確率）を併記している。両者の確率はほぼ同様であり、全国平均で約5.5%、全国最大で約

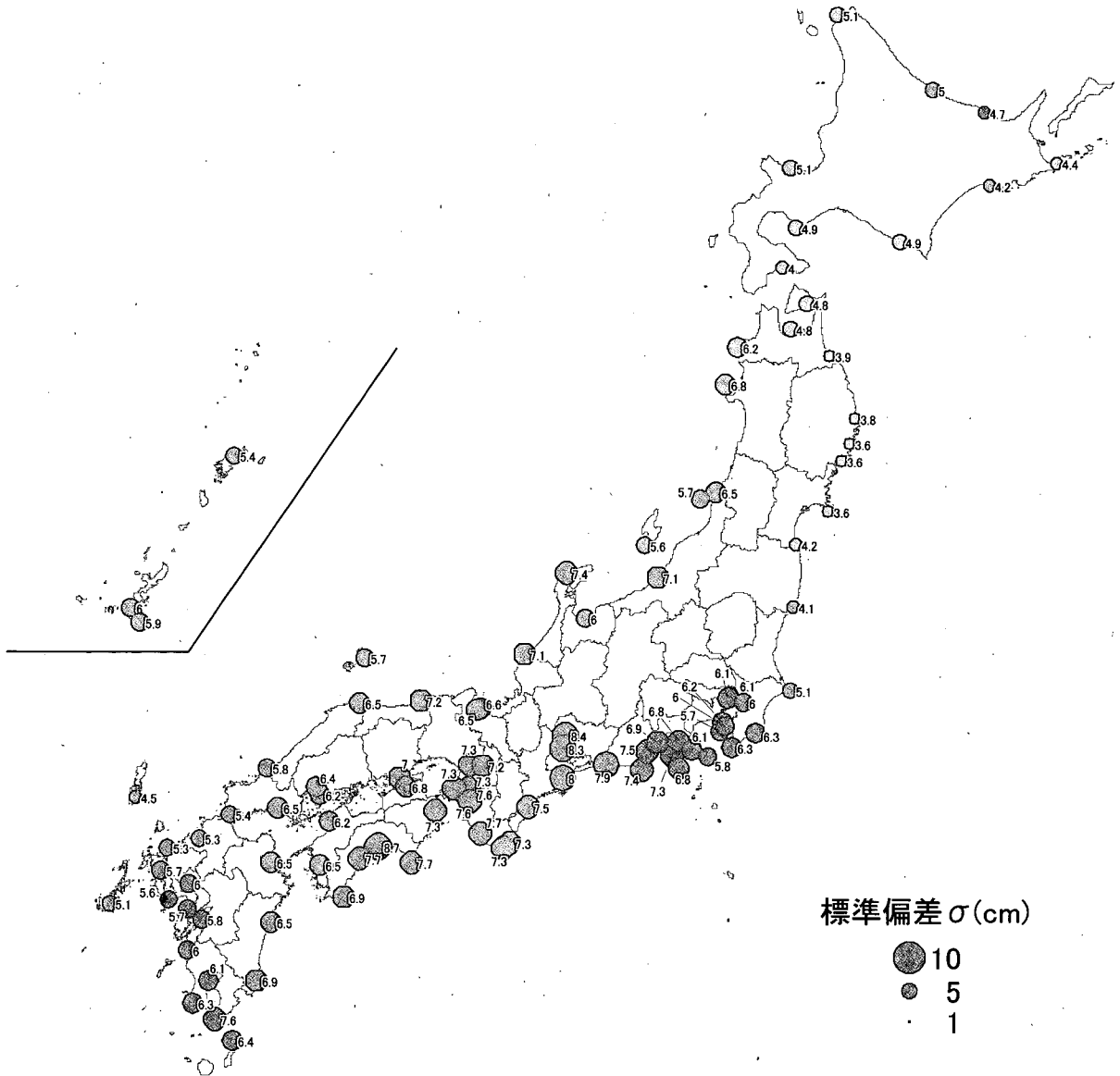


図-6 標準偏差σの地域分布

表-2 確率分布の全国統計 (単位 cm)

	全国 最大	全国 最小	全国 平均
平均 μ	0.13	-0.59	-0.03
標準偏差 σ	8.65	3.50	6.13
既往最大	48.0	14.0	27.6
既往最小	-16.4	-59.8	-25.5
+10cm 超過確率	11.6%	0.2%	5.4%
-10cm 非超過確率 [※]	13.8%	0.2%	5.5%

※-10cmを下回る確率

13%となっている。このことは、全国平均的には、年間約 20日程度、全国最大で年間約 50日程度、「高い」も

しくは「低い」異常潮位がそれぞれ発生することを意味している。

3.3 確率分布の経年変化特性

続いて、異常潮位の発生確率分布の経年変化特性について検討する。評価方法は、毎時の異常潮位データを各年毎に分割し、毎年の確率分布をそれぞれ算出した。算出した異常潮位の確率分布の経年変化を図-D.1~17に示す。図には、平均値および標準偏差の経年変化を線形近似した際の近似式を併記している。まず、平均値の経年変化については、いずれの観測地点もゼロを中心にほぼ横ばいとなっている。これは前述したとおり、本研究で用いた異常潮位データには、地球温暖化に伴う平均海

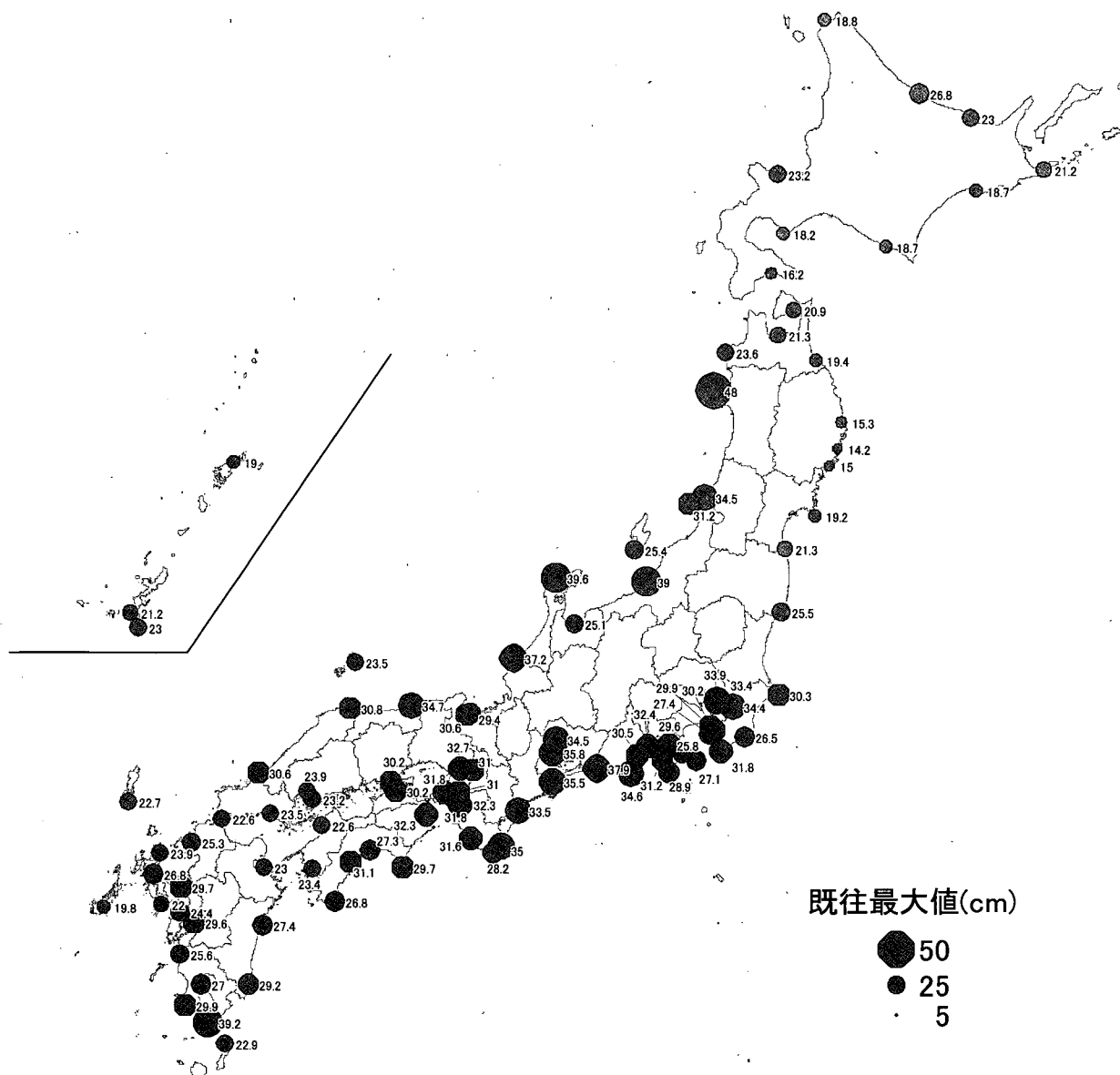


図-7 既往最大値の地域分布

面上昇などが含まれていないためと考えられる。標準偏差の経年変化に着目すると、北海道、東北および日本海側の観測地点については、年毎のばらつきは見られるものの傾向としてはほぼ横ばいとなっている。これに対し、関東以南の太平洋側の観測地点については、右肩上がりの傾向、つまり標準偏差が年々増加する傾向が見受けられる。特に、関東～南海にかけてはその増加傾向が明確である。ただし、観測地点によっては年毎のばらつきが大きいいため、標準偏差の増加傾向の有意性にやや疑義がある。

そこで、標準偏差の線形近似式の傾き、つまり標準偏差の年変化率を抽出し、その地域特性を評価した(図-8)。

図より、標準偏差の年変化率には上で述べた地域特性が明確に見受けられる。したがって、標準偏差の増加傾向は有意なものと判断される。特に、関東～南海にかけての太平洋側では年変化率が大きく、その最大値は1mm/年近くにまで達している。その要因が、地球温暖化に基づくものなのか、黒潮の流軸変動特性が変わってきているのか、それとも地殻変動やその他の要因によるものなのかについて、本研究で明らかにすることはできない。しかしながら、確率統計的観点から、これらの海域において、「高い」もしくは「低い」異常潮位の来襲頻度が年々増加する傾向にあると言える。

続いて、関東～南海にかけて見られた標準偏差の増加

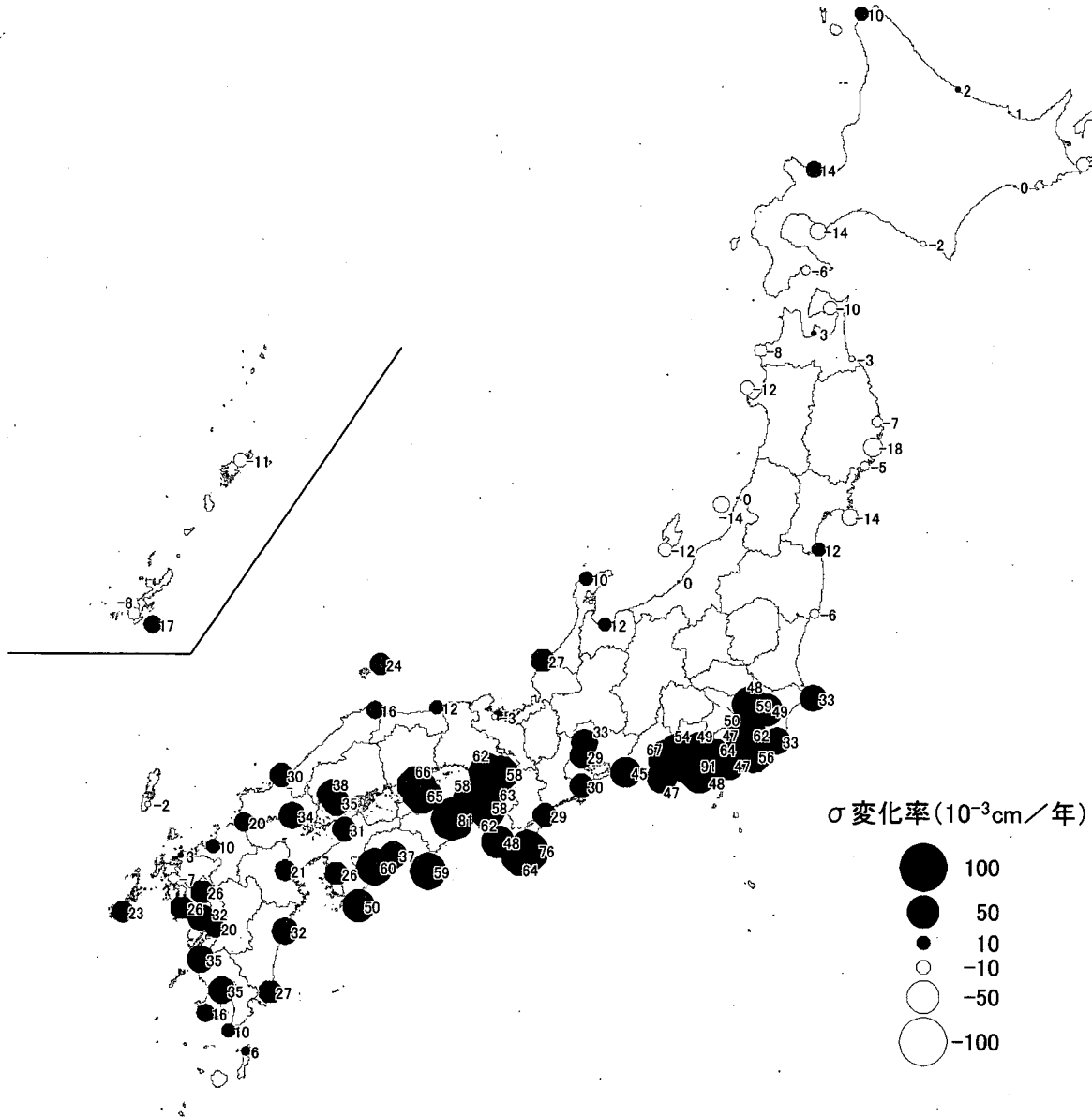


図-8 標準偏差 σ の年変化率の地域分布

傾向が、どのレベルの偏差の増加によってもたらされたのかについて考察する。図-E.1~17は、毎時の異常潮位データを用い、+10cm、+20cm、+30cmを基準値としてそれぞれを超えた回数に基づき超過確率を年別に算出し、その経年変化を調べたものである。年毎のばらつきはかなり大きいものの、+10cm超過確率についてはやはり、関東~南海の観測地点において年々増加する傾向が見受けられる。中には、1年間の+10cm超過確率が20%（年間70日以上）に達している地点も存在する。+20cm超過確率については、その値は小さいものの、特に東海地方において有意な値を示すとともに年々増加する傾向が見受けられる。+30cm超過確率についてはほとんどの

観測地点でゼロであった。

図-9は、図-8と同様に、基準値超過確率の年変化率を抽出し、その地域特性を見たものである。+10cm超過確率の年変化率の地域特性は、図-8に示した標準偏差 σ のものと同様であり、関東~南海にかけて特に高い正値を示している。例えば、年変化率が0.27%/年の高知では、+10cmを上回る日が年間約1日ずつ増えていることを意味している。一方、+20cm超過確率の年変化率の地域特性は、関東や東南海、南海地方についてはそれほどでもないが、東海地方についてはやや高い。この海域においては、+20cmを上回る「高い異常潮位」の来襲頻度が増加する傾向にあると言える。

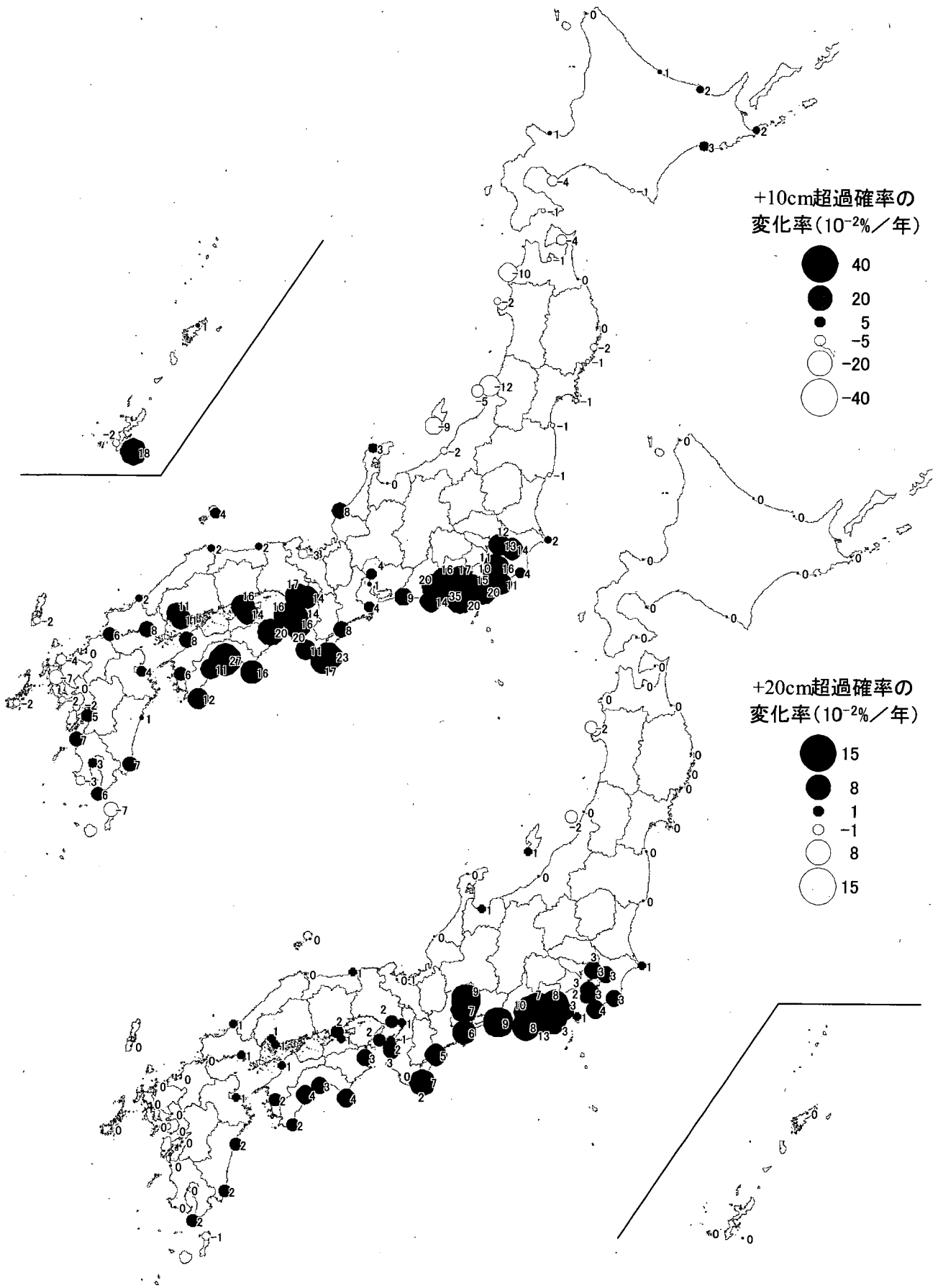


図-9 基準値超過確率の年変化率の地域分布 (上: +10cm, 下: +20cm)

4. 信頼性理論の概要

4.1 信頼性設計法の設計レベル

信頼性設計法は構造物の破壊可能性，言い換えれば安全性を確率論に基づく手法によって制御する方法であり，その制御方法に応じて3つの設計水準がある（表-3）。

表-3 信頼性設計法の3つのレベル

レベル	安全性照査式	基準パラメータ
レベル3	$P_f \leq P_{fa}$	破壊確率
レベル2	$\beta \leq \beta_T$	信頼性指標
レベル1	$R_d \geq S_d$ $\Leftrightarrow \gamma_R R_k \geq \gamma_S S_k$	設計用値 部分係数

最も高位に属するレベル3設計法は，構造物の破壊確率 P_f によって安全性を制御する方法である。これは最も精緻な方法であるが，確率変数が多数である場合，その結合確率を解析的に算出するためには，高度な作業を必要とする。また，近年の計算機能力の向上に伴い，モンテカルロシミュレーションによって破壊確率を算出することが可能となり，その高速化に関して多数の研究がなされているが，この方法も広義にはレベル3設計法に属する。

レベル2設計法は，信頼性指標 β によって安全性を制御する方法である。信頼性指標 (reliability index) は，図-10に示すように破壊領域と安全領域の境界点から平均値がどの程度離れているかを示す尺度であり，1次信頼性理論 (FORM: First-Order Reliability Method) に基づき次式によって算出される (星谷・石井, 1986)。

$$\beta = \frac{u_z}{\sigma_z} \tag{1}$$

ここに， Z : 性能関数， μ : 平均値， σ : 標準偏差

式(1)より明らかのように，信頼性指標 β を得るためには，性能関数 Z の標準偏差 σ_z を求める必要があるが，設計因子 (確率変数) が正規分布や対数正規分布以外の確率分布に従う場合や，性能関数が非線形である場合には，性能関数 Z としての確率分布が正規分布に従わないため， σ_z を得ることはできない。したがって，FORMでは以下に示す近似を行う。

- ① 性能関数 Z を確率変数 X_i に関してテーラー展開し，1次の項で打ち切り，線形化する (線形化近似)

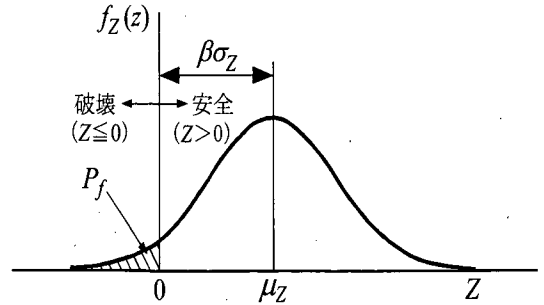


図-10 信頼性指標 β

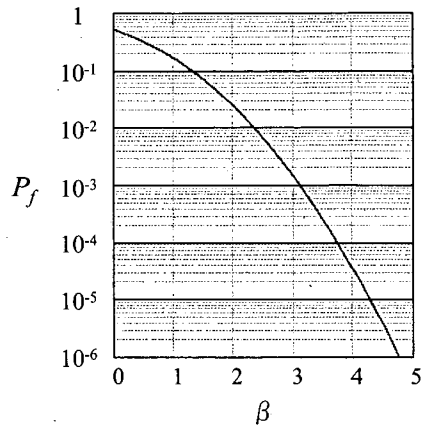


図-11 破壊確率 P_f と信頼性指標 β の関係

- ② 正規確率密度関数以外の分布を持つ確率変数を，正規確率変数で近似する (正規化近似)。
- ③ 確率変数間に相関がある場合は，変数変換によって独立な確率変数とする (変数変換)。

以上の近似により，性能関数 Z の確率分布が正規分布に近似され， σ_z を得ることが可能となる。

このような性能関数の正規化近似により，破壊確率 P_f と信頼性指標 β には次式に示す関係式が得られ，この関係を図示すると図-11となる。

$$P_f = 1 - \Phi(\beta) \tag{2}$$

ここに， $\Phi(\cdot)$: 標準正規確率分布関数

すなわち，信頼性指標 β と破壊確率 P_f は逆の関係にあり，信頼性指標が大きいくほど破壊確率は小さくなる。

最も平易なレベル1設計法は，部分係数 γ を用いた安全性照査式によって安全性を制御する方法である。各設計因子の特性値に部分係数を乗じて得られる値は，設計用値と呼ばれる。設計計算においては，耐力の設計用値 R_d が荷重効果の設計用値 S_d を上回ることを確認する。部

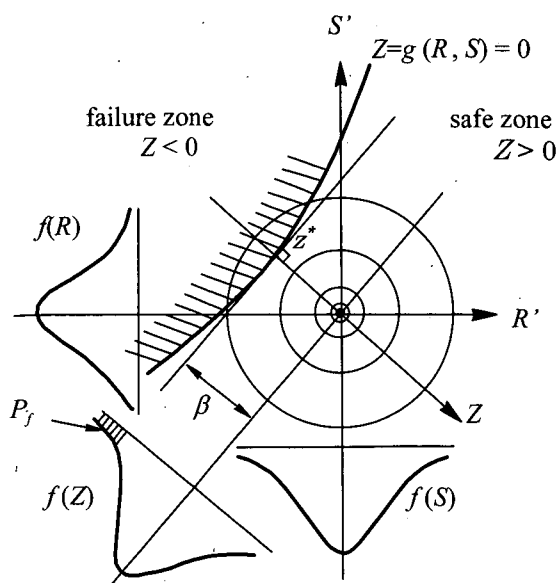


図-12 2変数の場合の標準化空間

分係数の設定においてはレベル2以上の確率統計解析が必要であるが、設計者にとっては、設定された部分係数を用いて設計を実施すればよいから、直接確率統計手法を必要としない。したがってレベル1設計法は、言わば準確率的な設計法である。

4.2 一次信頼性理論 (FORM)

まず、正規確率変数 X_i を次式によって平均値0、標準偏差1に標準化する。

$$X'_i = \frac{X_i^* - \mu_{X_i}}{\sigma_{X_i}} \quad (i=1, 2L n) \quad (3)$$

以下では、 X'_i によって表される空間を標準化空間と呼ぶ。性能関数が $Z = g(R, S)$ (R : 耐力, S : 荷重効果)によって定義される場合、標準化空間における破壊確率 P_f と信頼性指標 β との関係は、図-12のように表される。図中の原点を中心とする同心円は、 R と S の等結合確率密度線である。破壊領域 ($Z < 0$) における結合確率が破壊確率 P_f であり、標準化空間では次式によって定義される。

$$P_f = \iint_{Z < 0} \frac{1}{2\pi} \exp\left(-\frac{1}{2}(R'^2 + S'^2)\right) dR' dS' \quad (4)$$

Z が非線形である場合には、式(4)を解析的に解くことは困難であるため、 Z を線形化近似し、さらに破壊線

($Z=0$) に対して座標軸が直交するように座標変換することによって、式(2)が導かれる。したがって、信頼性指標 β は式(2)に示す標準正規確率分布関数の説明変数であるとともに、標準化空間においては原点すなわち平均値から破壊点までの距離を表す。信頼性指標の算出方法は、平均値周りの線形化近似に基づくCornell (1969)タイプと、破壊点周りの線形化近似に基づくHasofer-Lind (1974)タイプに大別される。前者はFOSM法 (First-Order Second-Moment method) あるいは2次モーメント法とも呼ばれ、後者はAFOSM法 (Advanced First-Order Second-Moment method) とも呼ばれる。評価精度としては、破壊点周辺の近似精度を高めたHasofer-Lindタイプの信頼性指標の方が安全性を正確に評価できることが知られており、正規確率変数間に相関がない場合には次式によって定義される (星谷・石井, 1986)。

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial Z}{\partial X_i} \Big|_{X^*} \right) (u_{X_i} - X_i^*)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial Z}{\partial X_i} \Big|_{X^*} \right)^2 \sigma_{X_i}^2}} \quad (5)$$

ここに、 X^* : 確率変数 X の破壊点における値

式(5)における破壊点 X^* は一意的には定まらないため、収束計算によって算出される。

感度係数 α は、性能関数の線形化近似における標準偏微分係数であり、確率変数間に相関がない場合には、次式によって定義される。

$$\alpha_{X_i} = \left(\frac{\partial Z}{\partial X_i} \Big|_{X^*} \right) \cdot \frac{\sigma_{X_i}}{\sigma_Z} \quad (i=1, 2L n) \quad (6a)$$

$$= - \left(\frac{X_i^* - \mu_{X_i}}{\sigma_{X_i}} \right) / \beta \quad (6b)$$

式 (6b) は、標準化空間における信頼性指標の各確率変数軸への方向余弦を表し、性能関数が $Z = g(R, S)$ によって定義される場合には、図-13に示す関係となる。感度係数は、確率変数間に相関がない場合には、耐力に対しては正值、荷重効果に対しては負値となり、その自乗和は1となる。また、図より明らかのように、感度係数の絶対値が1に近い確率変数ほど、破壊点における標準化した値が信頼性指標に一致する傾向となり、信頼性

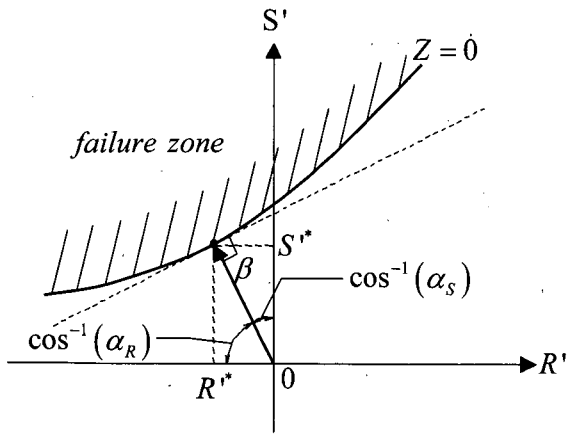


図-13 感度係数

指標に及ぼす影響が大きいことを意味する。

5. 異常潮位の影響評価

5.1 検討方法

信頼性解析は、今回評価した異常潮位の確率分布および長尾(2001, 2002)によってまとめられているその他の設計因子の従う確率分布(表-4)をもとに、FORMに基づき、Hasofer-Lindタイプの信頼性指標を算出する。表中のB, Vは、それぞれ平均値の偏り(平均値/特性値)、変動係数(標準偏差/平均値)であり、いずれの設計因子も正規分布を仮定している。考慮する破壊モードは、図-14に示した防波堤の滑動および転倒破壊であり、性能関数は、「港湾の施設の技術上の基準」(運輸省港湾局監修, 1999)に従い、式(7), (8)によって定義する。

(滑動破壊)

$$Z = f \left\{ \sum_i W_i - P_B - P_U \right\} - P_H \quad (7)$$

(転倒破壊)

$$Z = \left(a_1 \sum_i W_i - a_2 P_B - a_3 P_U \right) - a_4 P_H \quad (8)$$

ここに、

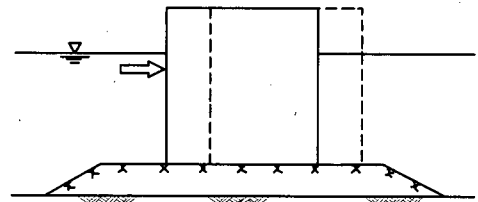
- f : 堤体底面と基礎との摩擦係数
- W_i : 堤体を構成する材料(鉄筋コンクリート, 無筋コンクリート, 中詰砂)の重量(kN/m)
- P_B : 堤体に作用する浮力(kN/m)
- P_U : 堤体に作用する揚圧力(kN/m)

表-4 他の設計因子の従う確率分布

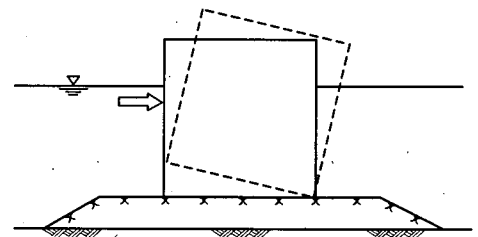
	B	V
波力(P_H, P_U)		
沖波波高推定精度	1.00	0.10
波浪変形計算精度		
水深変化緩	0.97	0.04
水深変化急	1.06	0.08
砕波変形推定精度	0.87	0.10
潮位(w_l)		
$r_{w_l}=1.5$	1.00	0.20
$r_{w_l}=2.0, 2.5$	1.00	0.40
摩擦係数(f)	1.06	0.15
単位体積重量(W_i, w')		
鉄筋コンクリート(W_{RC})	0.98	0.02
無筋コンクリート(W_{NC})	1.02	0.02
中詰砂(W_{SAND})	1.02	0.04

※) 水深変化緩/急: 海底勾配 1/30 未満/以上

※) r_{w_l} : 既往最高潮位(H.H.W.L.)とさく望平均満潮位(H.W.L.)の比



a) Sliding failure



b) Overturning failure

図-14 考慮する破壊モード

P_H : 堤体に作用する水平波力(kN/m)

$a_1 \sim a_4$: 各荷重のアーム長(m)

式より明らかなように、滑動破壊については水平方向の力の釣合いによって、転倒破壊については堤体前趾回りのモーメントの釣合いによって性能関数を定義している。また、信頼性指標の計算において、水平波力および

揚圧力は同様の確率分布に従うことから完全相関を仮定している。検討対象とする構造形式は、図-15に示すケーソン式混成堤および消波ブロック被覆堤の2形式である。検討ケースには、長尾（2001, 2002）によって全国広範囲より地域的、設計条件的に偏りがないように収集された76の建設事例（ケーソン式混成堤38ケース、消波ブロック被覆堤38ケース）を用いた。検討対象施設の分布を図-16に示す。

計算は、現行施設の断面に対し、異常潮位を考慮しない場合の滑動、転倒信頼性指標 β_{SL1} 、 β_{OT1} と、異常潮位を考慮した場合の滑動、転倒信頼性指標 β_{SL2} 、 β_{OT2} を算出し、両者を比較する。

(1) 異常潮位の考慮方法

続いて、異常潮位の確率分布の考慮方法について説明する。表-4 に示した潮位の確率分布は、長尾（2001,

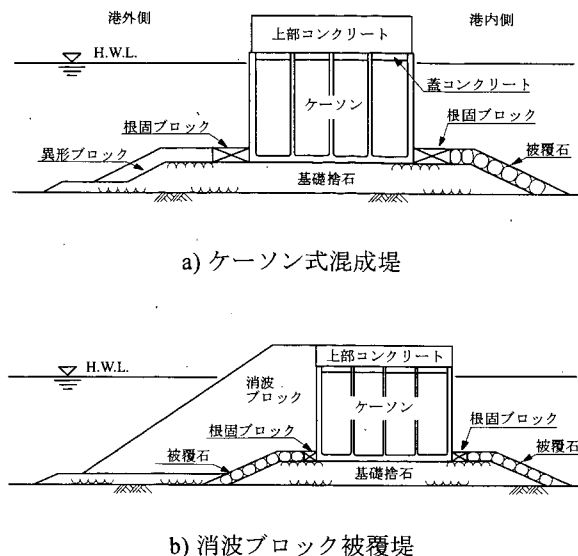


図-15 ケーソン式防波堤断面

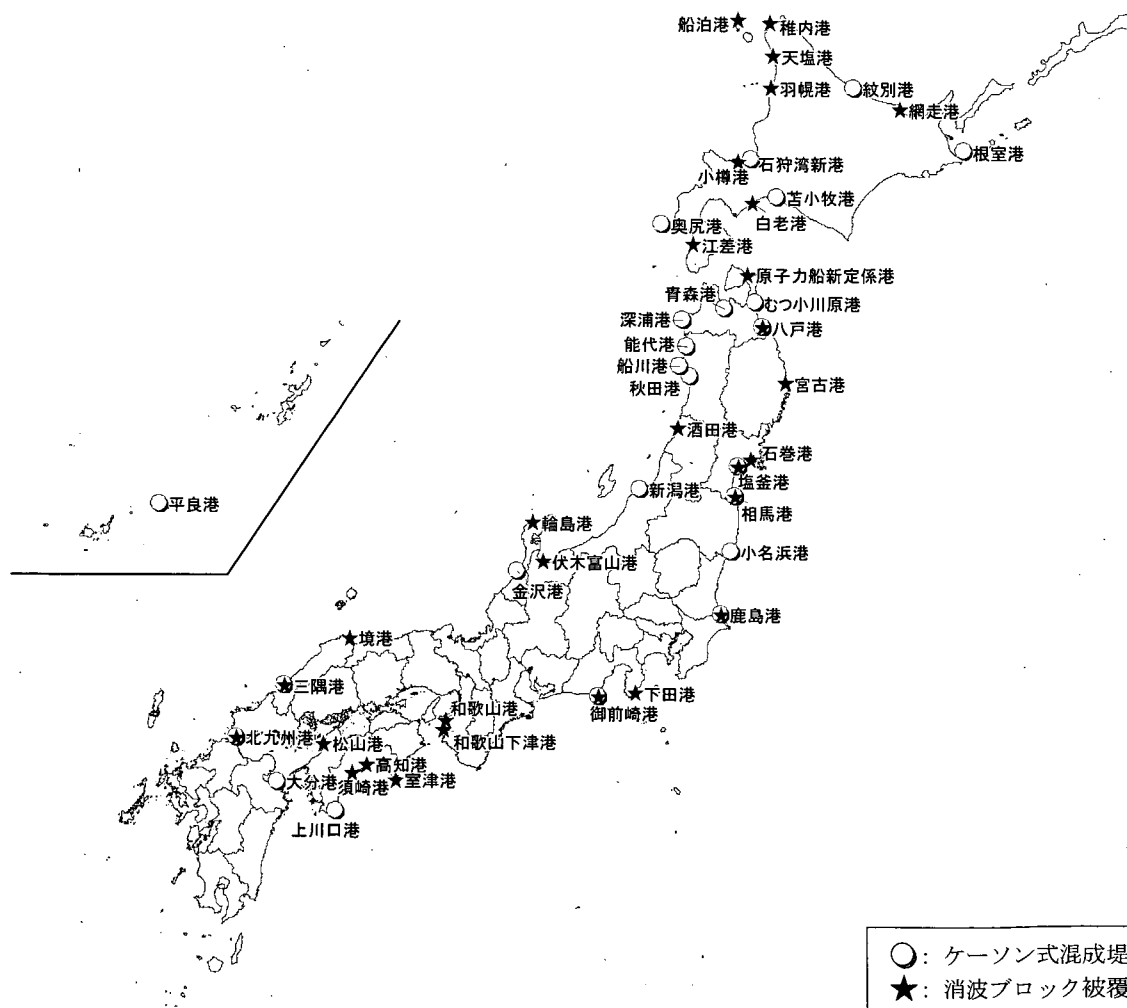


図-16 検討対象施設の分布

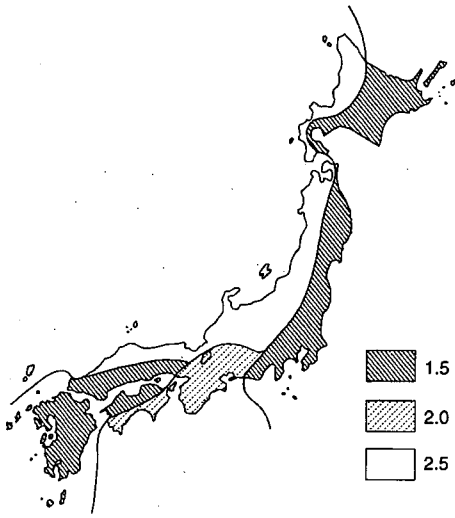


図-17 r_{wl} の分布

42002)が防波堤の被災時の潮位と設計潮位(H.W.L.)の比の分布によって評価したものである。被災時の潮位はH.W.L.を中心にばらついており、潮位パラメータ r_{wl} (既往最高潮位H.H.W.L.とさく望平均満潮位H.W.L.の比)に応じて変動係数を区別している。 r_{wl} の分布を図-17に示す。防波堤の被災は台風や発達した低気圧に伴う高潮の時期に生じるから、表-4に示した潮位の確率分布は高潮(厳密には、天文潮および高潮)による潮位の発生確率分布と捉えることができる。

本研究では、図-18に示すように、異常潮位の確率分布と高潮による潮位の確率分布を合成し、潮位全体の確率分布として考慮する。ここで、異常潮位の確率分布については、表-2より平均値をゼロとし、標準偏差については図-6で見たように、明確なエリア分けが困難であることから、安全側を考慮して全事例一律10cmとした。これにより、潮位全体の確率分布もまた、H.W.L.を中心にばらつくこととなる。潮位全体の標準偏差 σ_{wl} は、次式によって計算できる。

$$\sigma_{wl} = \sqrt{\sigma_{st}^2 + 2\rho_{st,ex}\sigma_{st}\sigma_{ex} + \sigma_{ex}^2} \quad (9)$$

ここに、

σ_{st} : 高潮による潮位の標準偏差

σ_{ex} : 異常潮位の標準偏差

$\rho_{st,ex}$: 高潮と異常潮位の相関係数

すなわち、 σ_{wl} を計算するには、高潮と異常潮位の同時生起性(相関性)を評価する必要がある。しかしながら、これまでのところ両者の相関性についての研究はほ

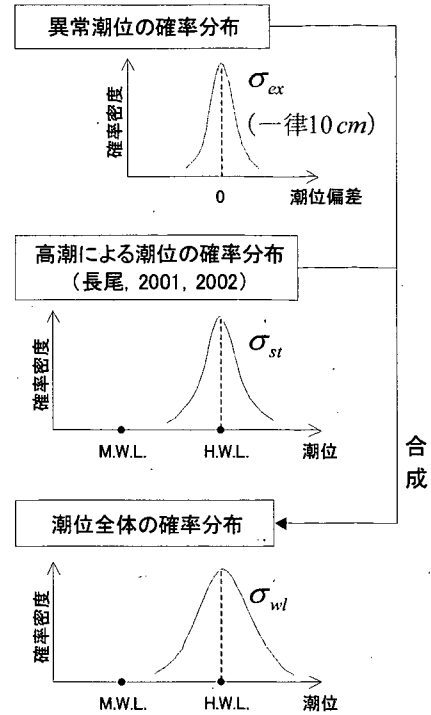
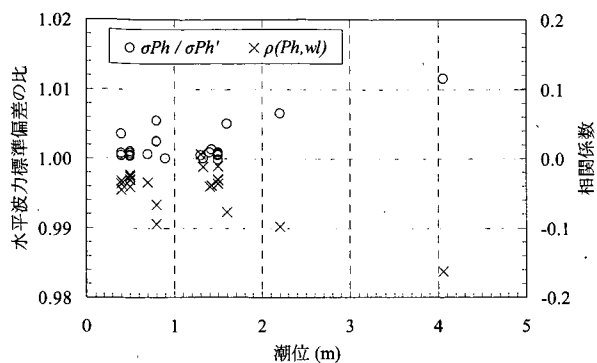


図-18 異常潮位の考慮方法

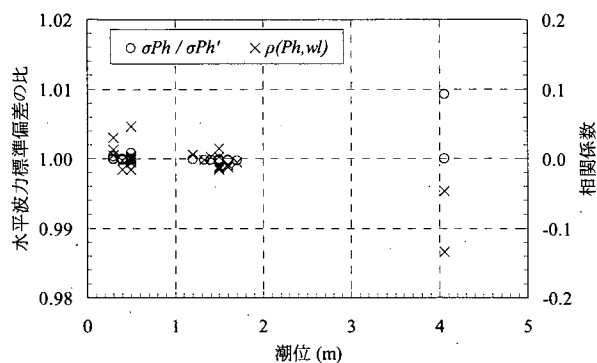
とどなされておらず、未解明の部分が多い。ただし、太平洋側の海域においては、沖合での台風通過が長周期の陸棚波として伝播することも考えられ、このような場合、高潮と異常潮位に何らかの関係があると考えられる。そこで本研究では、設計として最も安全側の評価となる相関係数 $\rho_{st,ex}$ が1、つまり高潮と異常潮位が完全相関であるとして信頼性指標を算出する。このとき、式(9)右辺は σ_{st} と σ_{ex} の和として表される。また、設計潮位として既往最高潮位H.H.W.L.を用いている事例については、高潮による水位上昇の確率分布は考慮せず、異常潮位の確率分布のみを考慮する。

(2) 潮位のばらつきが波力に及ぼす影響

潮位のばらつきの影響は、式(8)、(9)に示す浮力 P_B の他に、水平波力 P_H および揚圧力 P_U に対しても寄与する可能性がある。そこで、ケーソン式混成堤および消波ブロック被覆堤について、潮位と波高を確率変数としたモンテカルロシミュレーションを実施し、水平波力のばらつきに占める潮位のばらつきの影響度を調べた。得られた結果を図-19に示す。図の○で示す値は、潮位のばらつきの影響を考慮した場合の水平波力の標準偏差 σ_{ph} と、これを無視した場合の標準偏差 $\sigma_{ph'}$ の比を評価したものである。図には、水平波力 P_h と潮位 wl との相関係数 ρ を×として併記している。図より、水平波力の標準偏差



a) ケーソン式混成堤



b) 消波ブロック被覆堤

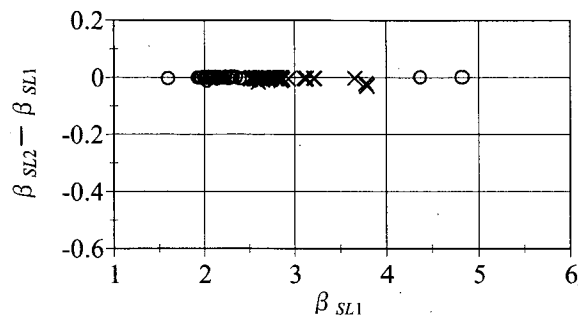
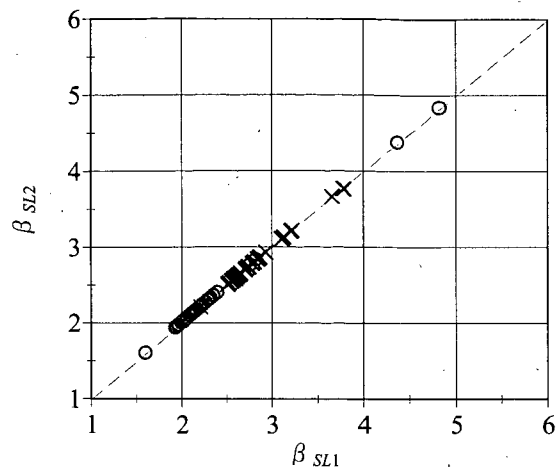
図-19 水平波力のばらつきに占める潮位のばらつきの影響

に占める潮位の影響は、最大でも1%程度であることがわかる。また、消波ブロック被覆堤における水平波力と潮位の相関係数は極めて小さく独立と見なし得るが、ケーソン式混成堤については弱い負の相関性が見受けられる。これは、ケーソン式混成堤については衝撃碎波力が作用し、潮位が低いほど水平波力が大きくなる傾向を示しているためと考えられる。以上のことから、潮位のばらつきの影響は、波高や波力算定式のばらつきに比較して極めて小さいものと判断される。したがって本研究では、潮位については波力への影響を無視し、浮力に対してのみ考慮するとともに、両確率変数間の相関性も無視し、独立変数として扱った。

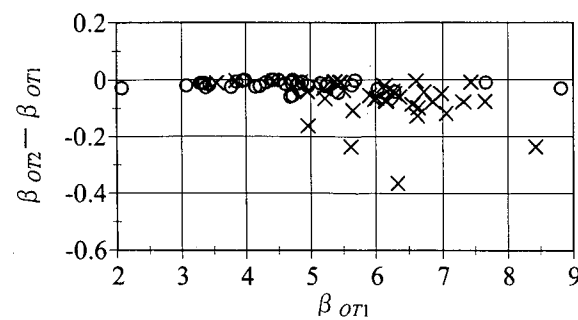
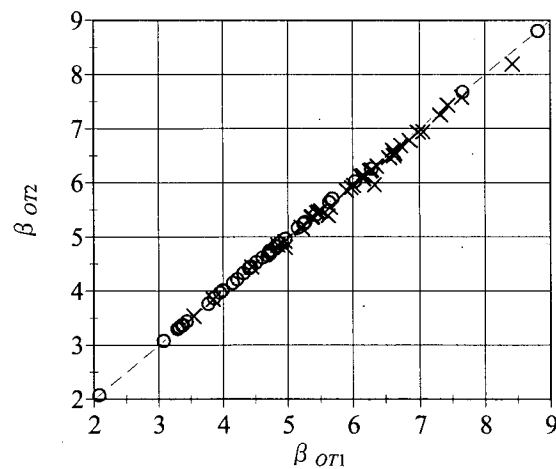
5.2 検討結果

(1) 外的安定への影響

図-20に、算出した滑動および転倒信頼性指標の比較を示す。横軸が異常潮位を考慮しない場合の信頼性指標 β_{SL1} 、 β_{OT1} であり、上段の縦軸が異常潮位を考慮した場合の信頼性指標 β_{SL2} 、 β_{OT2} 、下段の縦軸が両者の差を表している。滑動に関しては、 β_{SL1} と β_{SL2} は良く一致して



a) 滑動



b) 転倒

○ ケーソン式混成堤
× 消波ブロック被覆堤

図-20 信頼性指標の比較

おり、異常潮位による信頼性指標の低下は極めて小さいことがわかる。転倒に関しては、同じく β_{OT1} と β_{OT2} は概ね一致しているものの、ケースによっては異常潮位による信頼性指標の有意な低下が見られる。特に、消波ブロック被覆堤について低下幅が大きい。まず、このような破壊モードおよび構造形式による信頼性指標の低下幅の相違について考察する。表-5に、著者ら(2005)が評価した単位堤体幅当たりの信頼性指標変化幅の全事例平均値を示す。これより、滑動信頼性指標よりも転倒信頼性指標の方が堤体幅に対する変化が大きいことがわかる。これは、転倒に対しては堤体幅の変化が堤体有効重量だけではなく、そのアーム長にも影響するためである。さらに、ケーソン式混成堤よりも消波ブロック被覆堤の方が、信頼性指標の変化幅が大きい。これは消波ブロック被覆堤の場合、消波工の水平波力低減効果によって堤体幅が小さい構造となっているため、1mの幅の変化に対する安全性の感度が強く表れるからである。以上のことから、消波ブロック被覆堤の転倒破壊モードについて、異常潮位による信頼性指標の低下が大きく表れたものと考えられる。

続いて、このような転倒信頼性指標の低下がどの程度設計に影響を及ぼすかについて考察する。図-21は信頼性指標の相互関係を見たものであるが、これより転倒信頼性指標は滑動信頼性指標よりも総じて大きいことがわかる。このことから、転倒信頼性指標の最大0.4程度の低下は、設計断面にはほとんど影響しないものと考えられる。このことをより明確に示すため、滑動、転倒信頼性指標よりシステム破壊確率を計算し、その増加程度を検討する。システム破壊確率とは、複数の破壊モードを有する構造系全体の破壊確率であり、滑動および転倒破壊のシステム破壊確率 Pf_{sys} は次式で表される。

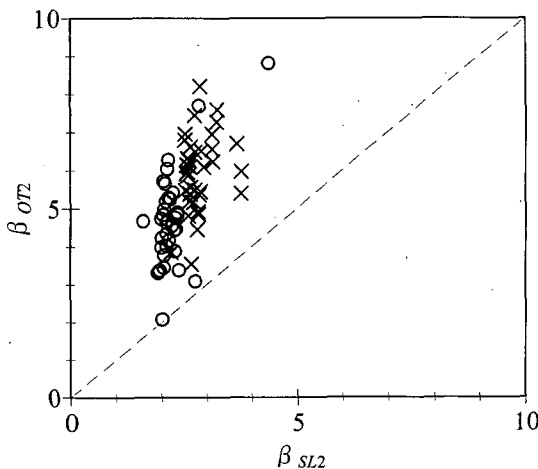


図-21 信頼性指標の相互関係

$$Pf_{sys} = \Phi(-\beta_{SL}) + \Phi(-\beta_{OT}) - \Phi_2(-\beta_{SL}, -\beta_{OT}, \rho_{SL,OT}) \quad (10)$$

ここに、 $\Phi_2(\cdot)$ は2次の結合確率分布関数であり、次式に示す Owen (1956) のモデルによって算出する。

$$\Phi_2(-\beta_i, -\beta_j, \rho_{ij}) = \Phi(-\beta_i) \cdot \Phi(-\beta_j) + \int_0^{\rho_{ij}} \frac{1}{2\pi\sqrt{1-t^2}} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{\beta_i^2 - 2t\beta_i\beta_j + \beta_j^2}{1-t^2} \right)\right) dt \quad (11)$$

また、破壊モード間の相関係数 ρ_{ij} は、FORMによって副次的に算出される感度係数 α を用い、次式によって評価する。

$$\rho_{ij} = \sum_X^n \alpha_{X,i} \cdot \alpha_{X,j} \quad (12)$$

式(12)は、各設計因子の感度係数を成分に持つ単位ベクトルの内積を表す。これを滑動、転倒破壊モードに適用し、書き下すと次式となる。

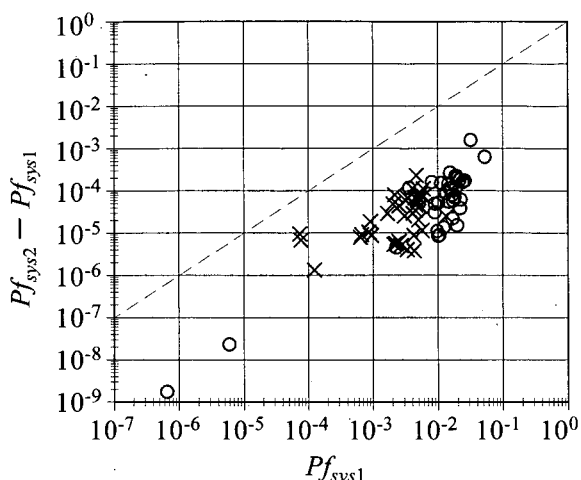
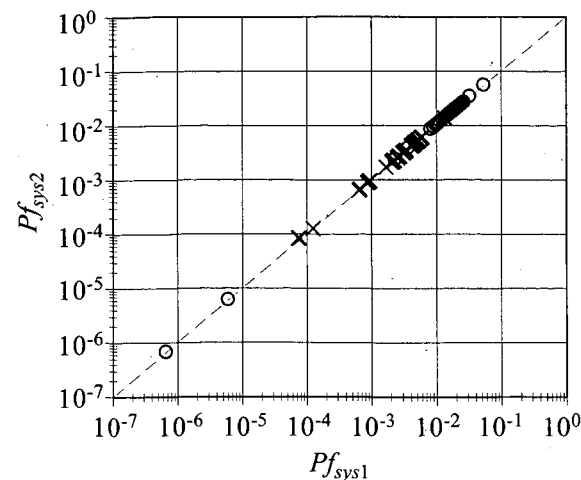
$$\rho_{SL,OT} = \alpha_{W_{RC,SL}} \alpha_{W_{RC,OT}} + \alpha_{W_{NC,SL}} \alpha_{W_{NC,OT}} + \alpha_{W_{SAND,SL}} \alpha_{W_{SAND,OT}} + \alpha_{W_{I,SL}} \alpha_{W_{I,OT}} + \alpha_{P_H,SL} \alpha_{P_H,OT} \quad (13)$$

以上の方法によって算出したシステム破壊確率の比較を図-22に示す。図-20と同様に、 Pf_{sys1} が異常潮位を考慮しない場合、 Pf_{sys2} が考慮した場合のシステム破壊確率である。システム破壊確率は $10^{-1} \sim 10^{-6}$ の広い範囲に分布しており、これは安全率に基づく現行設計法が安全性を制御できていないことを意味している。システム破壊確率で見ても、 Pf_{sys1} と Pf_{sys2} は良く一致しており、異常潮位の考慮による破壊確率の増加幅は、元の破壊確率の1/10以下であることがわかる。

以上により、異常潮位現象がケーソン式防波堤の外的安定性に及ぼす影響は小さいものと判断される。

(2) 要因分析

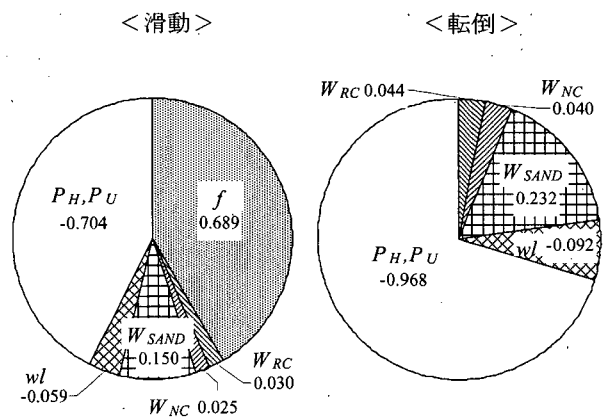
次に、異常潮位の影響が小さい要因について考察する。ある設計因子の影響度について検討するには、4.2 で述



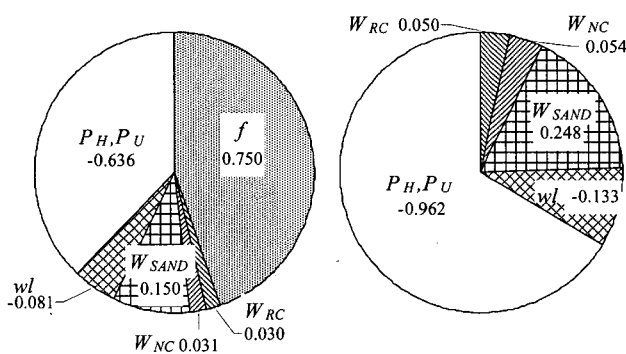
○ ケーソン式混成堤
× 消波ブロック被覆堤

図-22 システム破壊確率の比較

べた感度係数を比較すればよい。感度係数は、設計因子が信頼性指標に及ぼす影響度を表す係数であり、耐力に対しては正值、荷重効果に対しては負値となる。図-23は、ケーソン式混成堤、消波ブロック被覆堤それぞれの感度係数の分布を示したものである(著者ら, 2005)。各感度係数は、目標信頼性指標 β_T を 2.4 とし、これをちょうど満足する断面での値を全事例について平均して算出している。図より、同一因子の感度係数であっても、破壊モードや構造形式によって値が異なっていることがわかる。破壊モード別に値が異なるのは、式(6a)に示したように、感度係数の絶対値は、単に各設計因子のばらつきの程度だけではなく、性能関数の偏微分係数によっても変化するためである。構造形式別に値が異なるのは、表-4 に示した波力算定式の推定精度や各設計因子の作用程度が、構造形式によって異なっているためである。図より、潮位の感度係数はいずれも小さく、水平波力・



a) ケーソン式混成堤



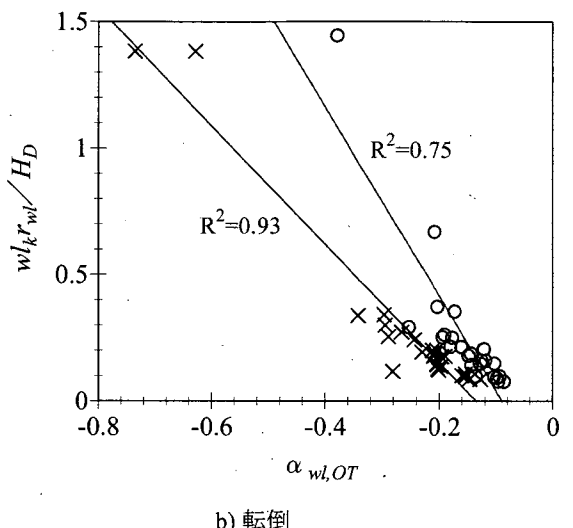
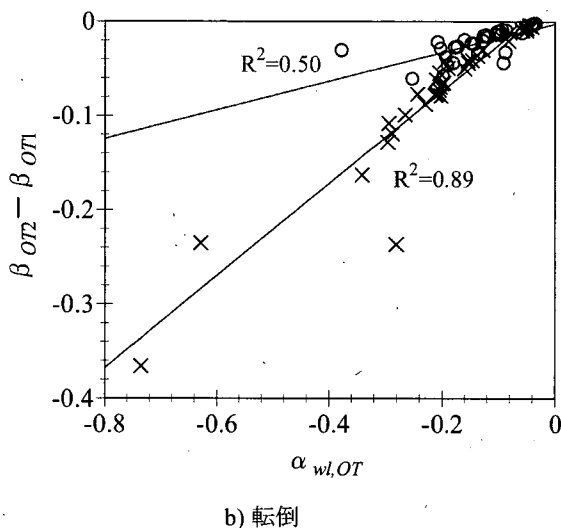
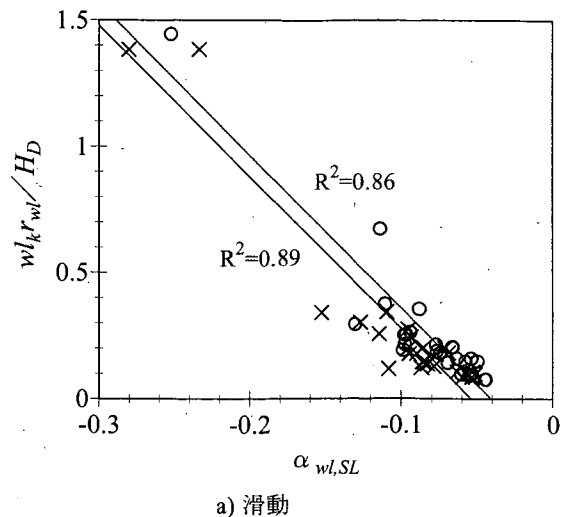
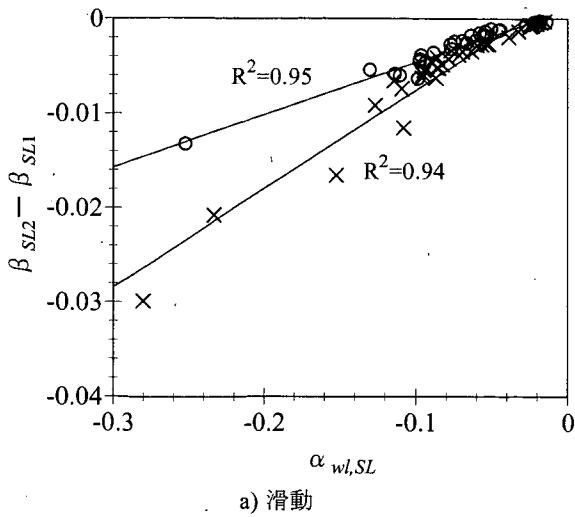
b) 消波ブロック被覆堤

図-23 感度係数分布(著者ら, 2005)

揚圧力や摩擦係数の感度が支配的であることがわかる。表-4 に示すように、潮位の変動係数は場合によってはかなり大きいにもかかわらず、その感度係数が小さいのは、たとえ潮位のばらつきが大きくても、浮力としてのばらつきが他の因子に比べて小さいためである。このように潮位の感度そのものが小さいために、異常潮位の影響度も小さく評価されたものと考えられる。

図-24 は、滑動、転倒それぞれについて、潮位の感度係数と、図-20 に示した信頼性指標の低下幅との相関を見たものである。図には決定係数 R^2 を付記している。これより、両者には高い正の相関があり、潮位の感度が高い(感度係数が-1に近い)ケースほど信頼性指標の低下幅が大きいことがわかる。つまり、潮位の感度が大きくなるような設計条件については、異常潮位の影響に若干注意が必要であると言える。

そこで、潮位の感度と設計条件との相関性について検討する。感度係数は、式(6a)右辺の偏微分係数を無視すれば、設計因子の標準偏差と性能関数 Z の標準偏差との比で表される。潮位の標準偏差は、設計潮位 wl_k ($=H.W.L. - L.W.L.$) と図-17 に示した潮位パラメータ r_{wl} との積



○ ケーソン式混成堤
× 消波ブロック被覆堤

○ ケーソン式混成堤
× 消波ブロック被覆堤

図-24 潮位感度係数と信頼性指標低下幅との相関

図-25 潮位感度係数と設計条件との相関

$wl_k r_{wl}$ に関係している。また、 Z の標準偏差については、図-23より最も感度の高い因子が水平波力・揚圧力であるから、設計波高 H_D との関係が強いものと考えられる。したがって、両者の比 $wl_k r_{wl}/H_D$ と潮位の感度係数との相関を調べた(図-25)。図より、いずれも高い負の相関を持っており、 $wl_k r_{wl}/H_D$ が大きい、すなわち設計波高に比べて潮位が大きいケースほど、潮位の感度が高いことがわかる。このような設計条件の場合には、異常潮位の影響に若干注意が必要となる。

最後に、本研究の検討範囲では、防波堤への影響は小さいとの結論に至ったが、万一、異常潮位の影響を無視し得ないとなった場合の設計での考慮方法を示しておく。先に著者ら(2005)は、重力式防波堤の外的安定に関する

部分係数のコードキャリブレーションを実施し、レベル1信頼性設計法を構築している。異常潮位の影響を考慮する場合は、その分だけ潮位の部分係数を割り増せばよいと考えられる。部分係数 γ_X は、式(6b)を X^* に関する等式に変形することによって、次式により算出される。

$$\gamma_X = \left(1 - \alpha_X \beta_T \frac{\sigma_X}{\mu_X} \right) B_X \quad (14)$$

ここで、 β_T : 目標信頼性指標、 B_X : 確率変数 X の平均値の偏り(平均値 μ_X と特性値 X_k の比)

異常潮位分だけ部分係数を割り増す場合は、式(14)に

おける σ_x として、高潮による潮位の標準偏差 σ_{st} の代わりに、異常潮位の標準偏差 σ_{ex} を含めた潮位全体の標準偏差 σ_{wl} (式(9)参照) を用いればよい。式(14)中のその他の記号、特に感度係数 α_x については、著者ら (2005) に示されている値をそのまま用いてよい。これは、感度係数を再評価しない簡易な部分係数の修正方法によっても、設計の合理性は維持されるからである (著者ら, 2004)。

6. まとめ

本研究では、異常潮位現象がケーソン式防波堤の外的安定性 (滑動, 転倒) に及ぼす影響を、一次信頼性理論に基づき明らかにした。得られた主要な結論を以下に示す。

- ① 全国97箇所, 最大29年間の潮位観測データに基づいて、異常潮位の発生確率分布を評価した。異常潮位は正規分布に極めて良く従うことが明らかとなった。異常潮位の標準偏差 σ は、全国平均で約6cm, 全国最大で約9cmであり、「高い」もしくは「低い」異常潮位の発生確率は、全国平均で約5.5%, 全国最大で約13%であった。
- ② 異常潮位の発生確率分布の地域特性として、北海道から東北の太平洋側では「高い異常潮位」の発生確率が低いこと、関東～九州西部にかけての太平洋側では発生確率がやや高いことがわかった。この傾向は、下野ら (2004) が行った異常潮位の出現特性解析結果と良く整合している。
- ③ 異常潮位の発生確率分布の経年変化特性を評価した。その結果、関東以南の太平洋側の観測地点については、標準偏差が年々増加する傾向が見られた。特に、関東～南海にかけての太平洋側では年変化率が大きく、その最大値は1mm/年近くにまで達している。これらの海域において、「高い」および「低い」異常潮位の来襲頻度が年々増加する傾向にあると言える。さらに、東海地方においては、+20cmを上回る「高い異常潮位」の来襲頻度も増加する傾向にある。
- ④ 異常潮位の確率分布 (全国一律 $\sigma=10\text{cm}$) をもとに、一次信頼性理論FORMに基づき、防波堤の滑動, 転倒安定性への影響を評価した。その結果、異常潮位を考慮した場合の信頼性指標の低下幅は小さく、その影響は小さいことがわかった。これは、潮位の感度が、波力や摩擦係数に比べて小さいためである。
- ⑤ 設計波高に比べて潮位が大きいような設計条件では、潮位の感度が高くなる。このような条件の場合には、

異常潮位の影響に若干注意が必要となる。その場合、異常潮位の標準偏差に応じて潮位の部分係数を割増すことにより、対応可能である。

また、本研究で実施した信頼性理論に基づく異常潮位の影響評価を、今後、防波堤に限らず他の港湾・海岸施設に適用していく必要がある。特に、護岸の越波量への影響は、防波堤の外的安定問題以上に大きいものと推察される。本研究で定めた異常潮位の発生確率分布や、信頼性理論に基づく影響評価方法が、今後の検討の一助となれば幸いである。

(2005年2月14日受付)

謝辞

本研究を行うにあたり、平成16年度「異常潮位検討委員会」の委員の皆様から大変貴重なご意見を頂きました。また、北澤港湾研究部長、港湾施設研究室をはじめ多くの方々のご多大なるご指導、ご協力を得ることによって本研究をとりまとめることができました。ここに記して、深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 運輸省港湾局監修(1999): 港湾の施設の技術上の基準・同解説, (社)日本港湾協会。
 海上保安庁海洋情報部ホームページ:
<http://www1.kaiho.mlit.go.jp>
 国土交通省(2002): 土木・建築にかかる設計の基本。
 下野隆司・仲井圭二・永井春生・松本英雄・渡邊和重・磯部雅彦(2004): 全国沿岸域における異常潮位の広域的出現特性, 海岸工学論文集, 第51巻, pp.1221-1225。
 末永正次・松本英雄・板橋直樹・三原正裕・梅木康之・磯部雅彦(2003): 広島湾の異常潮位について, 海岸工学論文集, 第50巻, pp.1316-1320。
 長 尚(1995): 基礎知識としての構造信頼性設計, 山海堂。
 永井紀彦, 菅原一晃, 渡邊弘, 川口浩二(1996): 久里浜湾における長期検潮記録解析, 港湾技術研究所報告, Vol.35, No.4, pp.3-35。
 長尾 毅(2001): ケーソン式防波堤の外的安定に関する信頼性設計法の適用, 土木学会論文集, No.689, I-57, pp.173-182。
 長尾 毅(2002): ケーソン式防波堤の外的安定に関する信頼性設計手法の提案, 国土技術政策総合研究所研

究報告, No.4, 26p.

広島港湾空港技術調査事務所 (2004) : 平成15年度 異常潮位検討調査報告書

星谷 勝, 石井 清(1986) : 構造物の信頼性設計法, 鹿島出版会.

吉岡 健・長尾 毅(2004) : ケーソン式防波堤におけるレベル1 信頼性設計法の合理的な適用方法に関する研究, 海岸工学論文集, 第51巻, pp.856-860.

吉岡 健, 長尾 毅(2005) : 重力式防波堤の外的安定に関するレベル1 信頼性設計法の提案, 国土技術政策

総合研究所研究報告, No.20, 38p.

Cornell, C. A. (1969): A Probability-Based Structural code, Journal of the American Concrete Institute, Vol.66, No.12, pp.974-985.

Hasofer, A. M. and Lind, N. C. (1974): Exact and Invariant Second moment Code Format, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol.100, No.EM1, pp.111-121.

Owen, D. B. (1956): Tables for computing bivariate normal probabilities, Ann, Math. Stat., Vol.27, pp. 1075-1090.