

港湾における地球温暖化への適応方策について

名城 整¹・平山 千尋¹

1 開発建設部 港湾計画課 (〒900-0006 那覇市おもろまち 2-1-1 那覇第2地方合同庁舎2号館)

沖縄は多くの離島からなる島嶼県のため、船舶が重要な交通手段となっており、安全に係留できる港湾の整備は、離島住民の生活や観光産業などの地域振興にとって重要である。近年、地球温暖化に起因すると思われる気候変動により、これまでの想定とは異なる状況が発生している。沖縄においても海面水位の上昇傾向や、異常潮位の発生などが確認されており、沖縄の港湾整備に深刻な影響を与えることが懸念されていることから、本調査では地球温暖化による気象海象条件への影響、港湾施設等への影響及びその影響への適応方策について検討するものである。

キーワード 地球温暖化、気温、海面水位、熱帯低気圧

1. はじめに

沖縄は多くの離島からなる島嶼県であるため、船舶が重要な交通手段となっている。このため、安全に係留できる港湾の整備は、離島住民の生活や観光産業などの地域振興にとって重要である。近年、地球温暖化による気象海象条件の変動に伴い、港湾施設に与える影響について懸念されている。今回は、地球温暖化による気象海象条件の変動について確認し、港湾施設（防波堤及び岸壁）に与える影響とその適応方策について検討を行った。

2. 地球温暖化による気象海象への影響について

図-1は世界の平均気温及び平均海面水位の変化を示している。このグラフを見ると、気温と海面水位がともに上昇傾向にあることが確認できる。

気温については、1956～2005年の最近50年間の昇温傾向は、10年あたり0.13°Cであり、1906～2005年の過去100年間での昇温傾向のほぼ2倍である。

図-2は観測された海面水位の上昇率と様々な要因を示している。1961年以降の観測結果より水深3,000mまでの層の全海洋の平均水温は上昇していることが確認されている。これにより熱が海洋に吸収され海水が膨張し、海面水位の上昇を来たしている。また、氷河と氷帽の広範囲にわたる減少は、海面水位上昇に影響しており、グリーンランドと南極の氷床の減少についても、1993～2003年の最近10年間の海面水位の上昇に影響した可能性が非常に高い。

IPCC第4次評価報告書では、地球温暖化による海面水

位の上昇の他に、台風の強大化が予測されている。しかし、台風の発生個数については不明確な部分が多く、明確な傾向は確認されていない。

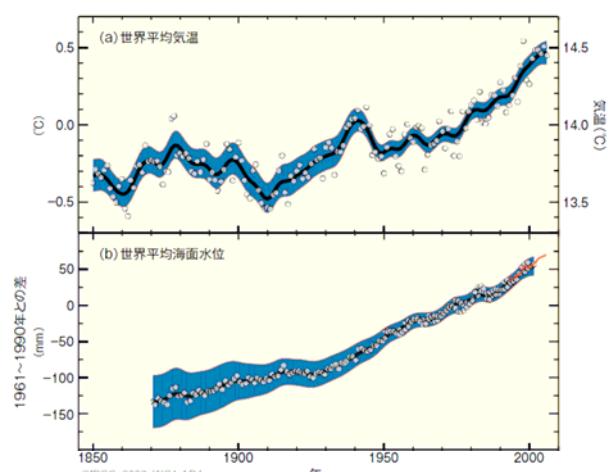


図-1 気温、海面水位の変化¹⁾

海面水位上昇の要因	海面水位の上昇率(mm/年)	
	1961～2003	1993～2003
熱膨張	0.42 ± 0.12	1.6 ± 0.5
氷河と氷帽	0.50 ± 0.18	0.77 ± 0.22
グリーンランド氷床	0.05 ± 0.12	0.21 ± 0.07
南極氷床	0.14 ± 0.41	0.21 ± 0.35
海面水位上昇に寄与する個別要因の合計	1.1 ± 0.5	2.8 ± 0.7
観測された海面水位上昇	1.8 ± 0.5 ^b	3.1 ± 0.7 ^b
差異 (観測値から気候の寄与の見積もりの総計を差し引いたもの)	0.7 ± 0.7	0.3 ± 1.0

図-2 観測された海面水位の上昇率と様々な要因¹⁾

3. 地球温暖化による港湾施設への影響

前述の通り、地球温暖化による気象海象への影響は、海面上昇が主な現象である。海面上昇による港湾施設へ与える影響は、構造物の安定性・安全性及び機能性への影響が考えられる。図-3は気象海象の変化に伴う港湾施設への影響を示している。通常の港湾施設には設計潮位の増大と、これに伴う波高の増大が大きく影響することが考えられる。また、台風の強化による設計風速の増大は、岸壁上の荷役クレーンや防波堤堤頭部の灯台への作用風圧に影響し、堤体の安定性に影響を与えることが考えられる。

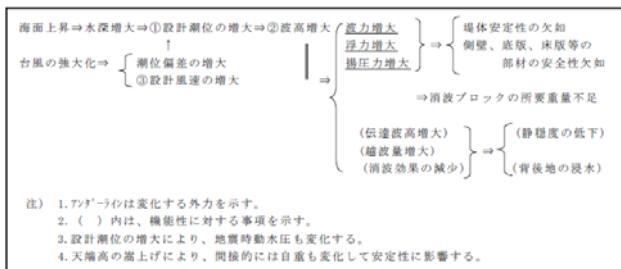


図-3 地球温暖化による港湾施設への影響

安定性・安全性に対しては、構造形式に応じて波力、浮力、揚圧力が変化する。また、地震時動水圧や背面に地盤が接している岸壁、護岸においては、残留水圧、土圧が増大することにより、堤体の安定性欠如などに影響することとなる。また、機能性については、地球温暖化によって海面上昇、波高増大等が生じた場合の岸壁、背後地への影響として、以下が考えられる。

- ・港内静穏度の低下による接岸・係留の安全性低下
- ・波浪や強風による荷役等の安全性低下
- ・岸壁上への浸水による漂流物（コンテナ等）の発生
- ・漂流物による二次的な被害の発生（岸壁等の損傷）
- ・岸壁上への浸水による機械等への悪影響
- ・天端不足の護岸からの越波等による背後地への浸水

4. 防波堤および岸壁への影響

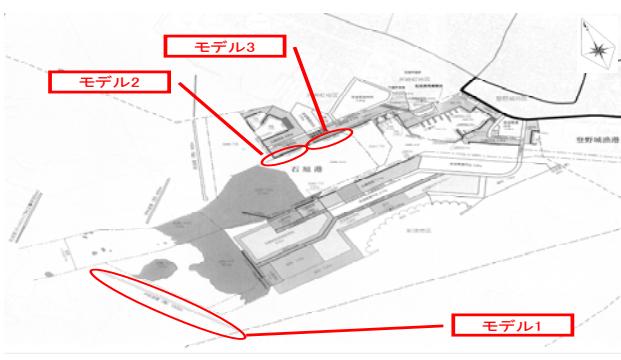


図-4 検討モデル位置図

石垣港の防波堤（モデル1）と岸壁（モデル2及びモデル3）を対象に検討を行った。各モデルの位置を図-4に示す。なお、海面上昇はIPCC第4次評価報告書（21世紀末の最大予測値59cm）をうけ、60cmとして設定している。

(1) 防波堤の機能性に対する影響について

今回、モデルとする防波堤は、石垣港の北西に位置し、水深20m以上の比較的深い海域からの進行波の防護として築造されており、要求される直接的な機能性は、港内の所要静穏度を確保することである。このため、港口幅を現況のままとしておく限りは、設計潮位、設計波高が増大することに対して構造形式に応じた所定の天端高を確保する必要がある。

防波堤に対する地球温暖化による主な自然現象は、海温の上昇など海面膨張に伴う海面潮位の上昇や、リーフ上などの浅海域での波浪変形に伴う波高等の強化がある。深海域を進行する波浪については、海底地形の影響を受け難いが、防波堤の沖合にリーフなどの浅海域の有無により、波浪の影響が異なる傾向にある。

また、進入波は竹富島や観音崎等による屈折などの波浪変形はあるものの、比較的海底地盤が深く、浅水変形の影響は少ない。従って、海面潮位が60cm程度上昇した場合においても、波浪の強化などの影響は殆ど受けない。但し、海面潮位上昇に伴い、上部工天端高の不足など温暖化の影響はある。

(2) 岸壁の機能性に対する影響について

岸壁に対して必要とされる機能性は、船舶の係留、人の乗降、貨物の荷役が安全で円滑に行えることである。この点からは、構造に要求される安定性・安全性と一体を成す部分もあるが、純粹に機能性だけに限定すれば、バース長、前面水深、天端高、岸壁の壁面及び前趾の形状（築造限界）、附帯設備が対象となる。従って、設計潮位、設計波高が増大することによって影響を受けるのは前面水深、天端高が挙げられ、前面水深は現況よりも深くなるため問題とはならないことから、岸壁の天端高だけが機能性の影響を受ける事となる。岸壁に対する地球温暖化による自然現象は、防波堤と同様に海水温の上昇など海面膨張に伴う海面潮位の上昇と、海面潮位上昇に伴う残留水位の上昇が考えられる。

港湾構造物への影響度は、概ね表-1の様な傾向があるものと推測される。

表-1 港湾施設における温暖化の影響度

温暖化の影響度		
大		小
<ul style="list-style-type: none"> リーフ等による波浪減衰効果が低下する防波堤等 	<ul style="list-style-type: none"> 重力式係船岸 リーフなど浅水域の影響の少ない防波堤 ※堤体に作用する浮力が主な要因。 	<ul style="list-style-type: none"> 矢板式係船岸 桟橋式係船岸 <p>※波浪の影響の無い、静穏域に築造されたものに限る。</p>

5. 適応方策の検討

(1) 防波堤における地球温暖化の適応方策

モデル1に対して必要な適応方策は、上部工天端嵩上げ及び滑動への対応である。嵩上げについては、必要天端高まで、上部工を嵩上げすることになるが、滑動の対策としては、堤体の重量を増すなどの対応が必要となる。モデル1での適応方策を考える上で留意する事項は以下の通りである。

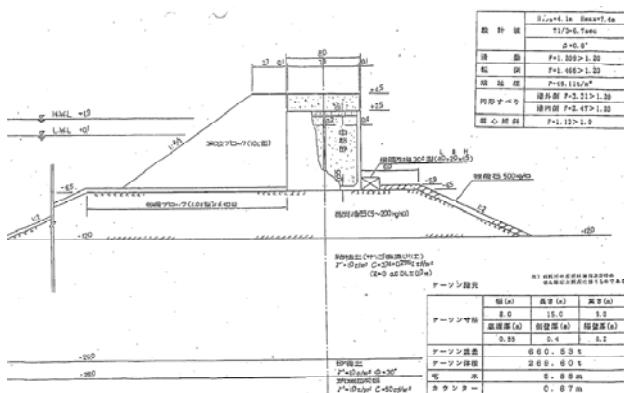


図-5 モデル1標準断面図

- ・上部工を嵩上げすることに伴い、波浪の受圧面が広がり、堤体に作用する波圧が増大し、滑動、地盤反力等が更に危険側に作用することになる。
- ・堤体の安定には、堤体重量を増加する必要があるが、試算の結果、上部工を普通コンクリートで嵩上げするだけでは、当該施設の安定性を確保できないため、高比重の重量コンクリートによる嵩上げが考えられる。
- ・滑動抵抗だけ考えれば、港内側に滑動抵抗用の捨石を投入することも考えられるが、試算の結果、モデル1の場合、波高の増大と嵩上げに伴う波圧外力の増大により、地盤反力が 700 kN/m^2 以上にも及ぶことが判った。このため、基礎の支持力の他、ケーソンの底版への負担が過大となることから、現実的な対応とならなかった。

- ・地盤反力を抑えるための対応策としては、ケーソン幅を拡幅することが有力である。このため、既設ケーソン（港内側）に腹付けコンクリートを打設して一体化し、地盤反力の低減と重量増加による滑動への対応を取ることが考えられる。

(2) 岸壁(ケーソン式)における地球温暖化の適応方策

モデル 2 に対して必要な適応方策は、上部工天端高の嵩上げ及び滑動への対応である。嵩上げについては、必要天端高まで上部工を嵩上げすることになるが、滑動の対策としては、堤体の重量を増すなどの対応が必要となる。モデル 2 の場合、60cm 潮位が上昇した時点の滑動安全率は、 $F=0.993 < 1.0$ であり、僅かの重量加算で安定性が確保できる。このため、重量の加算は最も施工が容易である上部工の拡幅が現実的である。

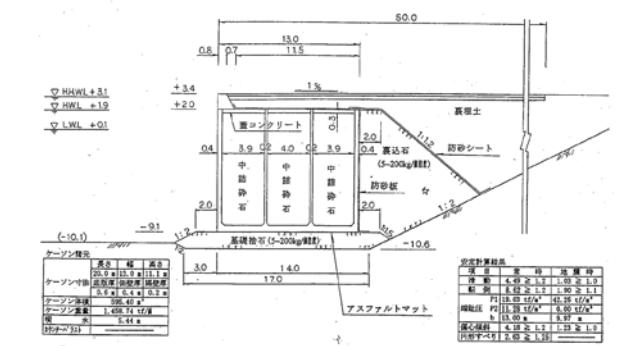


図-6 モデル2標準断面図

(3) 岸壁(矢板式)における地球温暖化の適応方策

モデル3に対して必要な適応方策は、上部工天端高の嵩上げである。地球温暖化による潮位上昇の影響も小さく、上部工の嵩上げも10cmと少ない。また、常時における安定性についても、前面矢板等の応力度や根入れ長ともに許容値内にあり、問題なかった。

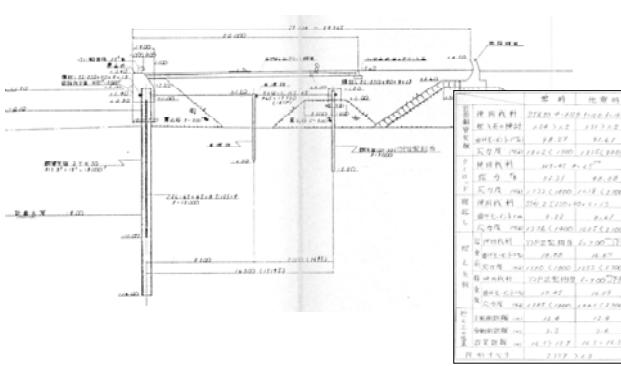


図-7 モデル3標準断面図

6. まとめ

全施設に対して共通して言えることは、地球温暖化による海面潮位の上昇に伴い、計画天端高（上部工天端高）が不足する施設が大半である。岸壁については、上部工天端高を設定する上で余裕高があり、ある程度は許容できるが、防波堤については、潮位のみならず波浪の影響も加わることから、天端高の不足傾向が顕著に現れる。

防波堤については、沖縄の特徴であるサンゴ礁による影響が大きいことが判った。リーフの影響の少ない、深海域を通過してくる波浪に対して築造されている施設は、海底地盤による波浪変形（浅水変形）の影響も少なく、海面潮位が上昇しても波浪の変化は殆どない。これに対し、リーフ上を通過してくる波浪は、リーフ上の潮位が上昇することで、波浪の減衰効果が減少し、リーフ透過後の波高が大きくなる傾向がある。このため、防波堤に作用する外力も増大し、施設性能の低下傾向が大きい。このため、上部工天端高の嵩上げ及び滑動への対応が適応方策として考えられる。

岸壁に対しては、ケーソン式の場合、海面潮位の影響で、「堤体に作用する浮力の増加」や「潮位上昇に伴う背面に作用する土圧の低下」、「残留水位の上昇に伴う水圧の増加」、「地震時の動水圧の増加」などが生じる。

今回の検証では、當時は、「堤体に作用する浮力の増加」と「残留水位の上昇に伴う水圧の増加」が「潮位上昇に伴う背面に作用する土圧の低下」より大きくなる傾向が強い。また、地震時は、「堤体に作用する浮力の増加」、「残留水位の上昇に伴う水圧の増加」および「地震時の動水圧の増加」が「潮位上昇に伴う背面に作用する土圧の低下」より大きくなり、全体的に施設は性能低下の傾向にある。このため、岸壁（ケーソン式）に対して必要な適応方策は、上部工天端高の嵩上げ及び滑動への対応が考えられる。

矢板式の場合、當時、地震時において若干異なる傾向にある。矢板式の場合、本体（矢板）には浮力を考慮しないが、前面矢板については、水圧の増加量に比べ、土圧の減少量が多いため、むしろ安全側に作用してくる。その他の部位（タイ材、腹起し、控え工）についても、當時は前面矢板と同様に安全側に作用する傾向が見られるが、地震時については、動水圧が加わることにより、若干ではあるが危険側に作用する傾向である。このため、岸壁（矢板式）に対して必要な適応方策は、上部工天端高の嵩上げが考えられる。

7. 今後の課題

(1) モデル施設の数

今回の検討結果は、管内の港湾施設の内、少數の施設を対象として得られた結果である。これまでの検討結果からも推測できる通り、例えば、防波堤については、リーフの影響の有無により、地球温暖化による影響の傾向が異なることなどが判っている。今後は、より多くの施設を対象に相関性を検証し、精度を向上させることが望ましい。

(2) 信頼性設計法の取扱い

現行設計の「港湾技術基準（平成 19 年度版）」は「信頼性設計法」が適用されている。「信頼性設計法」は、構造物の設計に確率論的な考え方を取り入れ、荷重や抵抗力のばらつきを考慮し、構造物が破壊する確率を一定の許容値以内に納めようとする設計法であるが、現在、同設計法で築造させている施設は、全国的にもごく僅かである。従って、既に築造されている施設に対して、同設計法を適用し温暖化の影響を精査しても、施設の安定性が欠如する施設が多数発生することが予想される。このような場合、根本的に既設構造物を大規模改良する必要があり、その改修費や改修期間が膨大となり、現実的な対応とは言い難い。仮に、一部の施設のみ、同設計法を適用するとしても、隣接する他の施設との横並び等、適用の線引きを決めるることは容易ではないため、取扱について検討が必要である。

(3) 沖波諸元の変更や港形の経年変化

沖縄管内では平成 18 年 4 月より、第三世代波浪推算モデル（WAM）による波浪解析が実用化されている。この波浪推算手法は、発達期の風波成分と減衰期のうねり成分を考慮可能な波浪推算モデルであるが、現在、築造されている防波堤などの波浪推算は、従来の有義波法及びスペクトル法が主流である。従って、既に築造されている施設に対して、WAM による波浪推算を適用し温暖化の影響を精査しても、施設の安定性が欠如する施設が多数発生することが予想される。

また、各港の港形においても、沖側に新たな防波堤の築造や延伸などにより、港形が刻々と変化していることから、設計当初との波浪推算の思想が異なり、既存施設に対して根本的に波浪解析を見直していくことになり、現実的な対応とは言い難い。このため、沖波の取扱についても検討が必要である。

参考文献

- 1) IPCC, 2007: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.