

コスタリカ国カルデラ港の現状と将来計画の課題について

Present Situation and Future Subject in Caldera Harbor, Costa Rica

ホセ モラ ギテレス・ヒルベルト ロドリゲス・ヘンリ アルファオ チャバリ¹
平山克也・中村聡志・岩波光保²・平石哲也³

Jorge Mora GUTIERREZ, Gilberto RODRIGUEZ, Henry Alfaro CHAVARRIA, Katsuya HIRAYAMA
Satoshi NAKAMURA, Mitsuyasu IWANAMI and Tetsuya HIRAISHI

Caldera harbor located in the Pacific coast of Costa Rica in the Central America was contracted in early 1970' and has been operated as one of the most important international cargo-handling port in the country. Heavy sedimentation and accumulation in the harbor have been observed since opening. In order to prevent the sedimentation, a breakwater was extended to the offshore and dredging in the anchoring area was occasionally carried out. A large storm destroyed the top of breakwater by 60m in 2004 and the water depth in front of a berth became shorter than initial. In order to keep the operation of port, evaluation of volume of sedimentation drifted into the anchoring area and reinforcement of damaged breakwater is necessary. Analytical and field survey to resolve such subjects were done in international collaboration.

1. はじめに

コスタリカ国カルデラ (Caldera) 港は、同国太平洋岸の最大の国際貿易港で、貨物取扱量も伸びており、今後もコスタリカおよび中米全体の経済を支える重要な拠点である。港は、1974年から1981年に日本の援助によって建設され、当時は日本から長期・短期の専門家も多く派遣されたが、1983年以降は継続的な技術支援はなされていない。その間、2002年の高波等によって防波堤の被災が生じたり、港内の漂砂埋没、岸壁の老朽化等の問題が生じてきた。しかしながら、コスタリカ政府からの要請にも関わらず、正式な調査支援はなされておらず、国際港湾交流協会がボランティア支援事業として、2008年にカルデラ港の現状を「コスタリカ国港湾フォローアップ調査」として取りまとめたただけである。

そこで、2009年4月から、国際協力機構 (以下 JICA) によって「カルデラ港改修計画」プロジェクトとして、複数の専門家が派遣され、コスタリカ国公共事業省 (以下 MOPT) と協力して、カルデラ港の現状を把握し、将来の維持管理や拡張計画における課題とその対策を検討した。本論文は、プロジェクトによって明らかになった海岸工学的課題を取りまとめたものである。

カルデラ港は、年間貨物取扱量は約400万トン (2007までの統計による) で、3つの岸壁を有している。東側から-7.5m岸壁130m、-10m岸壁150mおよび-11m岸壁150mである。図-1にカルデラ港平面図を示す。現在-7.5m岸壁

はタグボート係船用に使用され、荷役は-10および-11m岸壁で実施されている。岸壁エプロン背後には上屋が1棟あり、2009年から新しい保税倉庫が稼働している。カルデラ港は当初コスタリカ太平洋港湾公社 (以下 INCOP) 管理の港湾であったが、2001年から準備を始め、2005年に契約された新しい民間委託制度により2006年度より運営部門が民営化されている。これは、コンセッション (Concesion) といわれ、民間会社が長期契約に基づいて港湾の管理・運営・施設維持を担当するものである。契約先の民間会社はコスタリカとコロンビアの合弁企業であるカルデラ港湾会社 (SPC) 等で、契約は (i) 港湾の管理・運営 (補修と維持浚渫を含む) (ii) 新たなバルクターミナルの建設と運営 (iii) タグボートの運用、について成されており、利益の中から一定の割合を政府へ還元する。契約内容は港湾の状態によって見直しがなされるので、港湾の維持・補修に必要な作業とその費用の評価は重要で、機能を損なう港内埋没は大きな問題となる。

カルデラ港防波堤は、当初、高波来襲を防ぐために、250mが建設され、その後、高波と共に、漂砂による埋没を防ぐために、1995年まで45度港外側へ振った方向へ延伸が継続され、延長が270mに達した。2000年6月から2002年3月まで補修も行われたが、2002年5月の高波により先端部約60mが被災し、延長部の中詰め材や消波ブロック等が港内側へ飛散してしまった。一方、防波堤外側の砂の堆積は著しく、海岸線は年々前進している。堆積した砂は、防波堤を回り込んで港内の泊地と-11m岸壁前面に埋没し、大型船の係留に支障をきたしている。現在、浚渫作業はSPCによって引き継がれており、埋没量の推定は維持費用の算出に欠かせない。

1 コスタリカ公共事業省
2 正会員 博(工) (独法) 港湾空港技術研究所
3 正会員 博(工) 京都大学防災研究所

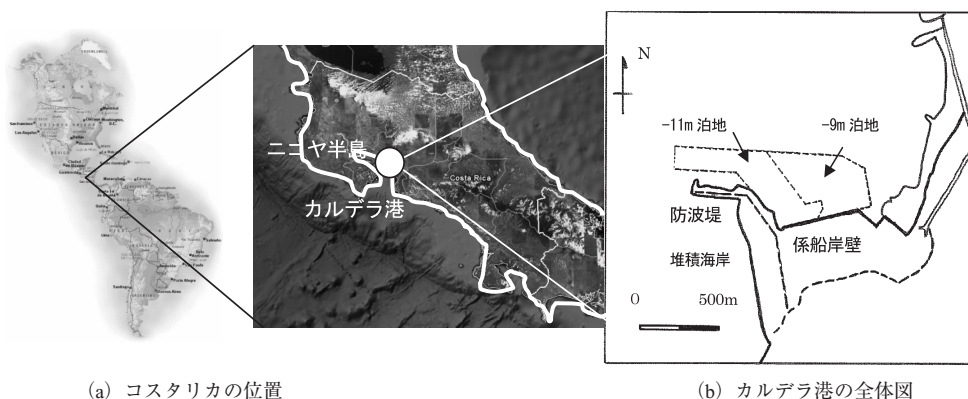


図-1 カルデラ港の位置 (Google Earth を用いてコスタリカ公共事業省作成)

ここでは、埋没量の推定および防波堤の補強法を中心にカルデラ港での課題を検討するとともに、将来のバース拡張計画についても議論をする。コンセッションの実施により、適切な理由があれば民間資金を活用する体制が構築されており、防波堤の延伸についても必要性の説明ができれば事業は可能である。

2. 港内埋没対策

(1) 港内地形の測量

カルデラ港に流入する漂砂量を検討するために、毎年の水深測量ならびにMOPTで実施した浚渫土砂量をもとにして、港内へ流入する漂砂量を推定した。図-2に水深測量結果の一例を示す。図-3は、カルデラ港周辺の現在の汀線の概略である。図中の左上の写真は、崩落しつつある波除堤を示す。カルデラ港に堆積する漂砂は防波堤外側から先端を回り込んで運ばれており、防波堤外側には堆積によって形成された新しい海浜が形成されている。海浜は毎年成長を続けているため、港内への移動量を少なくするために、民間会社に許可を与えて、陸上部で採取し、建設現場で使用することを認めている。写真-1に堆積によって新たに形成された海浜と陸上部での採取の状況を示す。採取量は、年間30,000m³である。

堆積土砂の総量は、初期の泊地水深-11mより浅い部分から推定し、1990年を基準として毎年の変化を求めた。この変化量を維持浚渫量として、コンセッション契約で港内水深を維持するための浚渫量を提示した。この際、堆積した砂浜を陸上部で掘削する作業の影響も考慮した。水深測量から得られた地形変化とMOPTが実施した埋没量の統計値を図-4に示す。なお、薄い直線で示した年間の変化量は、2009.6では前年に比べると大きく負になるが、ここでは、浚渫によってもとのレベルに戻ったものとして、0としている。

図-4で年間の堆積量を計算すると、2009.6までの8年間で

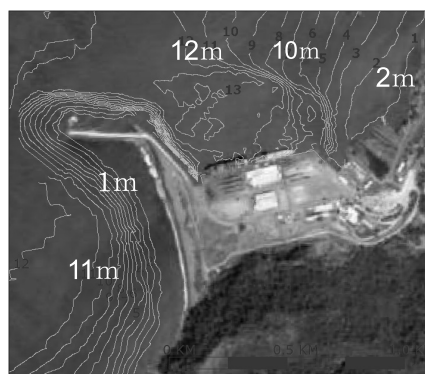


図-2 水深測量結果の例

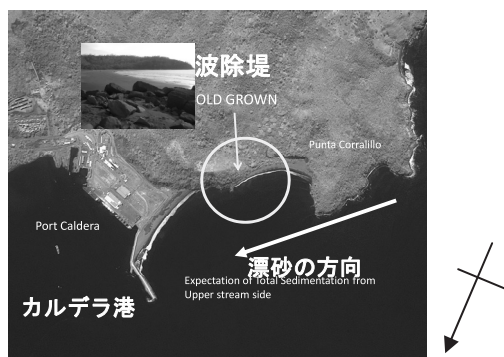


図-3 航空写真 (2008.9) による堆積海岸の概要 (図-2の左手が漂砂の上手側になり図-3では右側)



写真-1 カルデラ港防波堤外部に堆積した砂浜

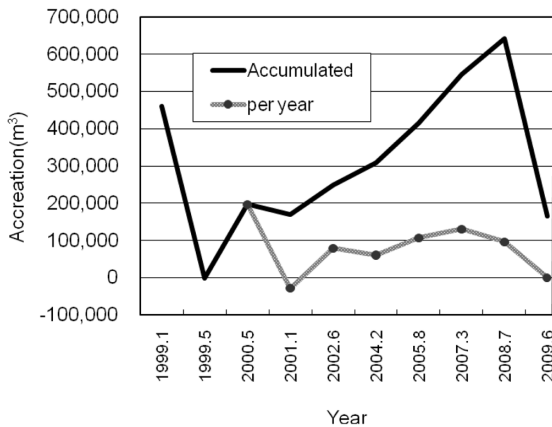


図-4 港内埋没量の変化

変化した約500,000m³を浚渫すると元に戻っており、年間に必要な浚渫量は約70,000m³/年となる。また陸上で30,000m³を掘削しており、契約上の維持浚渫量を40,000m³/年とした。この値をコンセッションの目標として設定すればよい。

(2) 将来の埋没対策

港内埋没対策には、漂砂を抑止できる防波堤の延伸が必要である。ただし、後述するように防波堤の補強には大型の消波ブロックが必要で、延伸には多大な費用が発生する。図-3に示すように、カルデラ港南側の砂浜には、一部沈下した波除堤が残っている。波除堤の上手側にも堆積によって形成された浜が広がり、その一部が浮遊して、岩礁と波除堤を回り込んで、カルデラ港防波堤背後に堆積している様子がみられる。したがって、波除堤を拡幅および延伸することで上手側の砂浜に堆積を促進し、防波堤を回り込んで港内埋没を引き起こす砂の量を減少させることができると思われる。波除堤は捨石堤タイプであり、延伸は容易であり、陸上部からの施工ができる。

3. 防波堤の補強

(1) 防波堤の履歴

カルデラ港の建設を開始した当時、防波堤前面の海底地形は、標高+9mから水深約-30mまで、勾配1:2の急斜面であったが、防波堤の建設とともに漂砂が堆積し、現在のような海岸が新たに形成された（前述の写真-1）。一方、カルデラ港内では、防波堤屈曲部より港内側で激しい堆積が生じている。被災した部分の被覆ブロックは港内側に運ばれて90度に折れ曲がったように堆積している。残された先端部及び港外側の補修では3.5tドロスを2層積み、1991年までに延伸された部分の補強では港外側に3.5tドロスを1層積み（その下はカルデラ港近傍で採れた質の悪い石の2層積み）を用いたが、2004年までに先端部のドロスが再度被災し、5t方塊で保護しているが、20個以上の方塊が同様に流されていることを確認した。



(a) 沖から見たドロス消波層 (b) 方塊の設置 (2005)

写真-2 カルデラ港防波堤の現状

MOPTの依頼により、Royal Haskoning (2004) は、必要なブロック重量算定のために被災要因調査を行っており、その資料を参考に防波堤の補強法を検討する。写真-2に先端付近のドロスと方塊による補強状況を示す。なお、カルデラ港防波堤を形成する捨石は、港内側を合わせると全部で4種類あり、防波堤建設初期に使用した紫色の石、次に使用した黒色の石、最近使用している赤色の石はカルデラ港から20km程度離れた場所では採れる。これらの品質（耐久性）は、赤>紫>黒の順に良い。

(2) 被災要因と補強方法

Royal Haskoning (2004) は、2002年5月に来襲した $H_{1/10}=5.84\text{m}$ の高波により、防波堤先端部が3日間にわたり被災したことを示した。この値をHudson式（土木学会、2000）に適用すると、10.2tドロスが必要と試算される。防波堤の主な被災要因としては、防波堤の基部補強で用いられているブロックの重量不足があげられる。

ここでは、Wave Watch III (NOAA) による波浪推算モデルを用いて、設計波を推定した。カルデラ港の北西部に広がるニコヤ半島沖の深海波浪の推算結果（1979-2000）（3h毎）を、1980年にJICAが行ったカルデラ港沖の観測データ（JICA、1981）によって、キャリブレーションを行った。

補正後の推算結果から3時間ごとの沖波波高を用いた50年確率波高として、 $H_s=4.1\text{m}$ （誤差は $\pm 0.5\text{m}$ ）（ $T=16-18\text{s}$ ）を得ている。補強に当たっては、所要重量を満たす

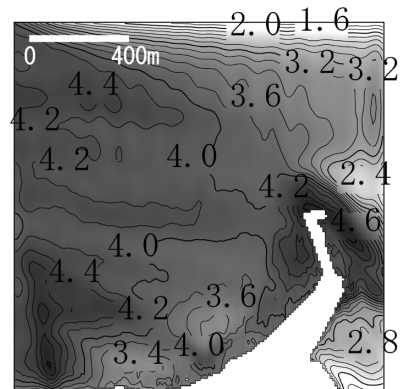


図-5 カルデラ防波堤先端部の波の変形
（図の左側がSSWで数値は（m））

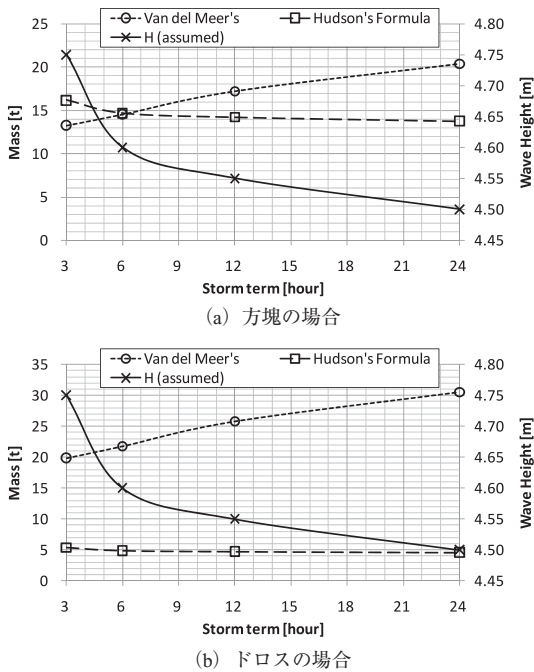


図-6 波の作用時間に着目した所要重量の算定イメージ

大型ブロックを投入する以外にも、防波堤先端で形成される浅瀬による碎波効果による波高減少を勘案して、小型ブロックで徐々に延伸していく手法も考えられる。そこで、プシネスクモデル (NOWT-PARI) (平山, 2007) を用いて、JICA 波浪観測地点 (水深15m) 付近から防波堤近傍 (水深2m: 防波堤先端周辺の漂砂堆積によるマウンド高さにほぼ相当) まで、詳細な海底地形を考慮した波浪変形計算を実施した (対象周期18s, 計算格子サイズ10m)。潮位は、+1.51mとし、沖での変形にはエネルギー平衡方程式を用いた。スペクトル形は簡単のため、ブレットシュナイダー・光易型スペクトルを適用した (波向SSWの場合: $H_s=4.1\text{m}$, 波向SWの場合: $H_s=2.5\text{m}$)。高波継続時間は3hrである。図-5に計算結果を示す。防波堤先端付近の波高は、期待したような碎波による減衰は確認されず、逆に、漂砂堆積マウンドによる屈折・浅水変形のために波高が増大した (波向SSWの場合: $H_s=4.75\text{m}$, $H_{1/10}=5.82\text{m}$, 波向SWの場合: $H_s=3.87\text{m}$, $H_{1/10}=4.59\text{m}$)。しかし、水深2m (潮位加算後3.5m) 付近では、屈折による波の集中を考慮しても、実際にはすでに碎波が生じていると考えられる。

計算結果のうち、最も厳しい波向SSWに対する波を設計波とした場合、3hr継続波浪に対する被覆ブロックの所要重量は、それぞれ以下のように推定される。

→Hudson式 (H_s を採用)

方塊: $\rho=2.3$, $K_D=4$, $\cot \alpha=2$ に対し, 17t

ドロス: $\rho=2.4$, $K_D=10$, $\cot \alpha=2$ に対し, 6t

なお, ρ はブロックの比重, K_D は安定係数, $\cot \alpha$ は斜面勾配である。

→Van del Meer式 (土木学会, 2000)

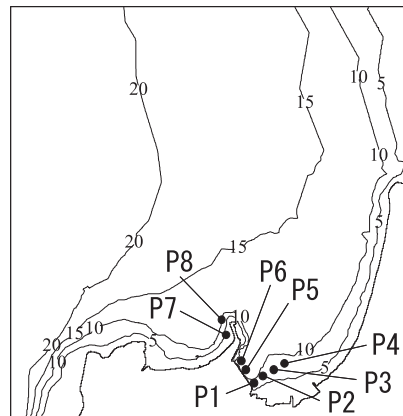
方塊: $\rho=2.3$, $P=0.4$, $S=1.5$, $\cot \alpha=2$ に対し, $N=600$ で14.

ドロス: $\rho=2.4$, $P=0.4$, $S=1.5$, $\cot \alpha=2$, $N=600$ に対し, 20t. ここで, P は計算で用いた透水パラメーター, S は被害レベルを表すパラメーターである。 N は作用波数である。

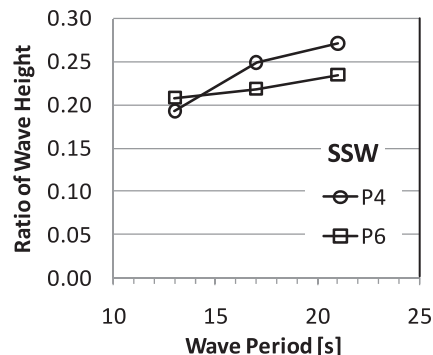
図-6に波の継続数による必要なブロック重量の計算結果を示す。Hudson式とVan del Meer式を用いて試算した所要重量のうち、方塊に対しては両者の結果は比較的良好に一致しているが、ドロスに対してはHudson式 ($K_D=10$) に比べ、Van del Meer式の試算結果は4~6倍大きい。この直接的な原因は、Van del Meer式における変形レベル S がドロスに対しては $S=1.5$ と厳しく設定されていることである。

4. 将来の港湾計画

カルデラ港沖の沖波波浪出現頻度分布は未だ適切に整理されていないので、ここでは、代表波浪に対して得られた各対象岸壁 (棧橋) 前面における港内波高比の値と



(a) 計画棧橋の位置 (P1-P4)



(b) 周期による波高変化

図-7 計画棧橋における荷役稼働率の変化 (P4)

表-1 カルデラ港における岸壁の維持管理基準

維持点検				
点検項目	範囲	点検頻度	評価基準	詳細
鋼矢板表面の状態	海面より上の目視可能範囲	年1回	錆の発生が認められるか、懸念される	
鋼矢板の電位	電位測定装置設置箇所と中間地点	年1回	海水－塩化銀電極基準で、防食管理電位-800mVを下回るか	電位<-900mV：防食状態 -800mV～-900mV：陽極の消耗や脱落が懸念されるので、海中部の陽極を調査する 電位>-800mV：防食状態ではなく陽極を取り替え、残存板厚を測定する
詳細調査				
項目	内容			点検頻度
海中部の鋼矢板表面	腐食の発生や孔あきなどの損傷の有無を確認			定期点検の結果、必要と認められたとき（5～10年に1回程度）
海中部の陽極の詳細調査	陽極の有無の確認、設置状況の確認、形状測定による残存質量の推定に基づく余寿命評価			
残存板厚の測定	残存板厚を用いた構造解析による構造体安全性評価、腐食速度に基づく余寿命評価、			
維持補修				
項目・内容	補修時期			
陽極の取り替え	陽極の消耗が著しいとき（完全に消失する前に行う）			
鋼矢板の補修・維持	残存板厚が十分でないとき（別途構造解析などを行う）			
異常時				
船舶の衝突などにより鋼矢板に著しい損傷が生じた際には、損傷状況に関する詳細な調査を行い、構造体の安全性が確保されるように対策の内容を検討する、				

その変化のみ検討した。図-7に示すように、将来、貨物取扱棧橋が現行の岸壁法線から直角方向へ延伸される計画が作られている（P1からP4）。新岸壁の対象地点における港内波高比は概ね0.2～0.4の範囲で算定された。しかし、現在の岸壁前面に位置するP5、P6では、来襲周期による港内波高比の変化はほとんどみられず、波向SSWで0.3、波向SWでは0.2ではほぼ一定であるのに対し、新しい棧橋前面に位置するP4および旧岸壁P6では、来襲周期が長くなるほど港内波高比が増加する傾向にある。したがって、沖波波浪の特徴によっては、棧橋前面の港内静穏度は現在の岸壁に比べ低くなる可能性が高く、現行の岸壁は使用できなくなる可能性があることなどが挙げられる。事実、岸壁前面の維持浸没によって、これまでに約20個の陽極が引き上げられているとのことである。また、建設時に用いられた陽極の仕様から考えると、ほとんどすべての陽極は消耗しているものと考えられる。今後の定期点検診断の内容として、表-1の維持管理水準を提案した。

5. 岸壁の維持管理

鋼矢板については、建設当初から電気防食が施されており、著しい腐食の進行はないものと考えられていた。しかし、2004年に実施された残存板厚の測定結果によれば、最大で1.75mmの減肉が確認されており、測定箇所

によって腐食量による減肉量が大きくばらついている。この原因としては、陽極の配置が適切でないために電気防食の効果が均一でないこと、陽極の一部が消耗あるいは脱落している可能性があることなどが挙げられる。事実、岸壁前面の維持浸没によって、これまでに約20個は脱落している可能性があることなどが挙げられる。

6. まとめ

ここでは、コスタリカ国カルデラ港における現状の課題を整理した。この港湾は日本の援助で建設され、太平洋岸の貿易港として日本との結び付きも強いので、海岸工学で得た知見を生かした技術協力が期待されている。

参 考 文 献

- 土木学会（2000）：海岸施設設計便覧，2.8波力，pp.89-92.
- 平山克也（2007）：プシネスクモデル（NOWT-PARI）を用いた高精度港内静穏度解析法の提案，港湾空港技術研究所資料No.1159，90p.
- Japan International Cooperation Agency(1981)：The feasibility study on the second stage expansion project of the port of Caldera, republic of Costa Rica, JICA Project Report, 343p.
- Royal Haskoning(2004)：Estudio de Revision del Rompeolas y Analisis Morfológico de Puerto Caldear, Informe Final, 76p.
- WAVEWATCH III, NOAA, <http://polarnccep.noaa.gov/waves/wavewatch/wavewatch.shtml>, 09-06-01.