リーフ掘削に起因する波浪場の変化がSanur海岸の 養浜後海浜に及ぼした影響評価

Response of Nourishment Beach to Change in Wave Field Associated with Dredging of Reef Flat

遠藤将利¹·小林昭男²·宇多高明³·野志保仁⁴·岩瀬光平¹·大中 晋⁵

Masatoshi ENDO, Akio KOBAYASHI, Takaaki UDA, Yasuhito NOSHI Kohei IWASE and Susumu ONAKA

In the southern part of Sanur Beach, Bali, beach erosion occurred between groins after the extensive beach nourishment, resulting in shoreline rotation between groins. The cause of shoreline changes were investigated by the field observation of bathymetric survey and sampling of bottom material, and numerical simulation of beach changes were carried out using Noshi et al.' (2008) model. It was found that the shoreline rotation was triggered by the dredging of reef flat, which caused the change in wave direction on the reef flat.

1. まえがき

Bali島南部のSanur海岸(図-1参照)ではリーフが発達 し、浅いリーフと海岸線に沿って伸びる海浜とがセット となって優れた海洋リゾートを形成しているため、毎年 多くの観光客で賑わってきた、しかしながら主に建設材 料を得る目的で coral mining が行われた結果, 1970年代よ り侵食が進み良好な環境が失われてきた、このため日本 からの援助も受けて,大規模な養浜を中心とする海岸保 全が2001年から進められた(大中ら, 2005).具体的に は、Nusa Dua海岸南方のリーフ沖の水深20~30 mの浚 渫土砂約30万m³による養浜が行われた.養浜後,大部 分の区域では安定な海浜が形成されたが、図-2に示すよ うに、Sanur海岸南端部のリーフの陸端に造られた突堤 G39とGA2間では局所的に著しい侵食が起き、汀線が大 きく湾入するとともに,満潮時に背後の遊歩道近傍まで 波が打ち上がるようになった. このような局所的海浜変 形と密接に関連する要因としてはリーフの掘削が挙げら れる (宇多ら, 2003). 1990年代, Sanur海岸南西部にお いてリーフの大規模掘削により航路を掘ると同時に、掘 削土砂により埋め立て地を造成する大規模なリゾート開 発計画が立てられ、計画は1997年から実施に移された. この結果、リーフがあるため静穏であった海域において リーフの掘削により水深が著しく増加し、結果的に汀線

1	学生会員		日本大学大学院理工学研究科
2	正会員	工博	日本大学教授理工学部海洋建築工学科
3	正会員	工博	(財)土木研究センター常務理事なぎさ総
			合研究室長兼日本大学客員教授理工学部
			海洋建築工学科
4	正会員	博(工)	(有)アイコムネット
5	正会員	工修	日本工営(株)コンサルタント海外事業本
			部

への作用波高が増大するとともに、入射波向に著しい変 化が起きた.掘削前のリーフは干潮時に干出するような 高さであったが、そこに水深ほぼ9mの掘削穴が形成さ れた.本研究は、Sanur海岸の養浜後の局所的海浜変形 の原因を定量的意味から明らかにすることを目的とす る.このため養浜後のモニタリング測量データを分析す るととともに、2008年8月23日には地形測量と前浜の表 層サンプリングを行い、その上で野志ら(2008)の粒度 組成を考慮した等深線変化モデルを適用することにより 侵食原因の明確化を図った.

2. 対象地域の概況

Sanur海岸は長さ約6.2kmのリーフ海岸であり、Bali島



図-1 バリ島の Sanur 海岸の位置



図-2 Sanur 海岸南部の空中写真(2004 年撮影)

の南東部にあって東に面している(図-1).当海岸の沖波 波浪条件としては、平均的には1m以下の頻度が95%以 上であり、周期は9~11sが卓越している(大中ら,2005). Sanur海岸では、13基の突堤と離岸堤1基の建設が行われ た後、約30万m³の養浜砂が投入された.養浜工の平面 形状は、養浜後の変形を最小限とするため、汀線が卓越 入射波の方向と直角となるよう、養浜前の汀線形状に沿 う形とされた.また汀線変化予測計算により汀線の安定 性を確認した.さらに必要養浜幅については侵食前の 1970年代当時の汀線位置までの復元を基本とし、平均的 な海浜幅として約20mを設定した.

本研究の対象区域はSanur海岸南部の図-1の矩形区域 である.2004年撮影の斜め空中写真(図-2)に示すよう に,手前(東)側から4基の突堤(G38,G39,GA2,GA1) がリーフ面へと汀線と直角方向に伸びている.沖合には リーフの平坦面が続き,その大部分はアマモなど海草で 覆われている.一方汀線近傍には急勾配の砂浜が帯状に 広がっている.突堤周辺の汀線形状に注目すると,G39 とGA2間では局所的に著しい侵食が起き,GA2の手前で 汀線が大きく湾入しており,他の区域と明らかに特長が 異なる.一続きの海岸線がG39とGA2の間でのみ周辺区 域と特徴が異なることは,この付近に何か特別の要因が あり,しかもGA2の手前(東)側直近の汀線が後退して いることから,この付近での波の入射方向が局所的に変 化した可能性が高い.

G39とGA2付近の波浪場に影響を及ぼすものとして、 その南西側で行われたリーフの掘削がある. これによる 波の場の変化については、すでに宇多ら(2003)が放物 型モデル(磯部, 1986)を用いて波浪場を求めている. 図-3は、宇多らが求めたSanur海岸沖のリーフ掘削後の 深浅図(2002年3月測量)と波向分布を示す。波浪条件 としては、Sanur海岸への卓越波浪であるH₀=1.3m, T=13sの波をSE方向から入射させている。従来沿岸方向 にほぼ一様に発達していたリーフが大きく掘削されてい る. 図に示す矩形領域が本研究の対象領域である. 従来, リーフエッジ付近ではリーフに対してほぼ直交するよう に屈折していたが、穴の形成によって細長い深みからエ ネルギーが侵入することになったため、汀線に対し直角 ないしやや左側からの波の入射が、掘削穴の形成によっ て右約20°の方向からの入射へと変化した.また図-3に よれば、このような波向変化が現れた区域はSanur海岸 の南端部の300m区間に限られているのが特徴である. このような波向変化があったことにより、G39とGA2の 間では、中央より右側では汀線後退、左側では汀線前進 という、斜め入射波条件下での汀線変化が生じたと考え られる.図-4は対応する波高分布を示すが、Sanur海岸の 当該区域では幅約1 kmのリーフが発達しているため波浪



図-3 Sanur 海岸南部の水深と波向分布(字多ら, 2003)



は減衰し, リーフ上の波高はほぼ1mとなる. なお, Sanur海岸の潮位はL.W.L. (D.L.) 0mとしたときH. W. L. は+2.6 mにあり, 平均的なリーフ上水深は+0.5m程度で ある.

3. 地形変化の実態

(1) 養浜後の海浜形状の変化

養浜は2003年には完了したが、その後数ヶ月間隔でモ ニタリング測量が行われた.ここではまずこのモニタリ ングデータの分析を行った.図-5には、養浜前の1997年、 養浜直後の2003年、およびその後2008年まで4回行われ たモニタリング測量(全6回)による突堤GA2とG39間 の海浜形状の変化を示す.1997年には浜幅が狭く、汀線 が背後地近傍まで迫っていた.この状態において養浜が 行われた結果、2003年には平均海岸線とほぼ平行に約65 mの砂浜が創出された.しかし2003年までに拡幅された 海浜は右(南)側からの入射波の作用により右回りに回 転し始め、2008年までにはG39の先端部を東向きの沿岸 漂砂の一部が越えるまでの著しい変形が生じた.この海 浜変形に伴ってGA2の東側隣接部では汀線の後退と同時 に浜崖も形成され、海浜の利用条件の低下を招いた.

図-6は養浜直後の2003年から2008年までの侵食 (A)・中立(B)・堆積域(C)の縦断形変化を示す. なお測線A,B,Cの位置は図-5に示す.養浜によりほぼ 1/10勾配の断面が造られたが,波の作用によりほぼD.L.



図-5 1997, 2003, 2004, 2005, 2006, 2008年の実測深浅図

図-6 測線A,B,C における海浜縦断形 の比較

+0.5mから+4mまでの間で断面形が平行移動しつつ縦断 形変化が生じ、西側の測線Aでは侵食されて断面が23m 後退し,東側の測線Cでは汀線が24m前進したことが分 かる.これらに対して海浜中央の測線Bでの汀線後退量 は5mと小さく、測線Bを境として東西で対照的な地形変 化が生じたことが分かる.なお各図にはM.S.L. (D.L. +1.3m)とH.W.L. (D.L. +2.6m) も示すが、わが国の外 海・外洋に面した海岸で見られるように、汀線からバー ム頂までほぼ一定の前浜勾配で標高が増加した後、バー ム頂から陸側では逆勾配で緩やかな勾配を持って標高が 下がるという特性を示していない. 各縦断形とも, 平均 汀線からD.L.+4mまで1/14の一定勾配を保ったまま地盤 高が上昇し、D.L.+4mの平坦面へと繋がっている.これ より、図-6に示す縦断形は波の作用によって砂礫が分級 されつつ形成された断面形ではなく、養浜時の断面形が 強く残されつつ変形が起きたものであることが分かる.

(2) 粒度分布

図-7には2008年8月23日に測線A,B,Cで行った底質粒 度調査の結果を示す.測線Aでは,H.W.L.付近の+1.9 mにおいて礫の含有率が18%と高く,逆に細砂は7%と わずか含まれるのみである.またH.W.L.(D.L.+2.6m) とM.W.L.(D.L.+1.3m)の間では,礫および粗砂の含 有率が高まっている.測線Bでも礫と粗砂の含有率が,



表-1 計算条件			
初期地形	養浜直後の実測値		
	0.106mm: 5%		
	0.25mm:45%		
初期粒径と含有率	0.425mm: 35%		
	0.85mm:10%		
	2mm:5%		
	0.106mm:1/65		
	0.25mm:1/30		
平衡勾配	0.425mm:1/10		
	0.85mm:1/7		
	2mm: 1/5		
交換層幅B	1.3(m)		
	砕波波高 H _b =1.0m		
入射波条件	砕波波向 α _b =20°		
	潮位条件M.S.L.=1.3(D.L.m)		
地形亦化の水涇範囲	地形変化の限界水深 h _C =D.L.+1m		
地形发化*7水休轮因	バーム高 h _R =D.L.+4m		
境界条件	左右境界の漂砂移動量なし		
	漂砂量係数A=0.3		
漂砂量係数	小笹ブラントン項の項数 0.5		
	岸沖漂砂量係数Kz/Kx=0.2		
土砂落ち込みの限界勾配	陸域:1/2, 海域:1/3		
計算メッシュ	⊿Y=5m, ⊿Z=0.5m		
計算時間間隔⊿t	0.001		
計算ステップ数	500,000		

H. W. L.とM. W. L.の間で高い. 測線Cの分布は測線Bと 似ており, H. W. L.とM. W. L.の間で粗砂の含有率が高い が,沖方向にもほぼ一様な分布となっており, D. L. +0.6 mでも一部礫が含まれると同時に粗砂の含有率が高い. このような粒度分布は通常リーフ海岸以外の海岸で見ら れる粒度特性とは異なっている.

4. 野志モデルの適用

現地調査結果をもとに、野志ら(2008)による粒度組 成を考慮した等深線変化モデルを当海岸に適用した.図-3に示す波向分布をもとに、波高1m、周期13sの波を右 20°の方向から2003年の養浜後地形に作用させた。潮位 条件はM.W.L. (D.L. +1.3 m) とした. 初期粒径は汀線 の後退により形成された浜崖部分から採取した試料から 求めた粒度分布を岸沖方向に一様に与えた.表-1には計 算条件を示す.初期粒径とそれに対応する含有率,およ び粒径ごとの平衡勾配は表-1の通りである.また地形変 化の範囲としてはバーム高h_B=D.L.+4m, 波による地形 変化の限界水深hcはリーフの平坦面D.L.+1mとした. 図-8は2008年の予測地形である.計算結果は図-3(f)に 示した2008年の実測形状をうまく再現できている.また 漂砂下手側となるG39付近では浅海域で等深線が大きく 前進し、G39を超えた漂砂の存在を示唆する.図-9は実 測と計算の汀線変化の比較であるが、実測汀線では曲率 が大きいのに対し、計算汀線は曲率が小さいなど相違点 も見られるものの、全体的な汀線変化はほぼ再現できて いる.図-10は実測と計算による縦断形の比較であるが、 侵食・堆積域の縦断形もほぼ再現できている.図-11に





は測線A.B.Cに沿った粒度組成の岸沖分布を示す。測線 Aでは、H. W. L.付近の+2.2mにおいて礫の含有率が51% と高く、逆に細砂は3%とわずか含まれるのみである。 またH. W. L.とM. W. L.の間では礫および粗砂の含有率 が高い.これらの予測結果は図-7に示した測線Aにおけ る粒度組成の岸沖分布とよい対応を示す.一方,測線 B,Cでは浜崖形成が進んだ+2.7mから+2.2mの間では礫の 礫含有率が70%程度と高まるという結果となっている が、実測値(図-7参照)ではその付近に礫は出現してお らず, むしろH. W. L.とM. W. L.の間での礫の含有率が 相対的に高まっており、予測結果とのずれが大きい、ま たG39近傍に位置する測線C上で、沖合(地盤高0.7,0.6 m付近)でも一部礫が現れ、また粗砂が57%と多く含ま れていたが、予測計算ではこの付近は細砂で覆われてお り,両者不一致である.図-12は2008年8月23日撮影の G39先端部の状況であるが、西側から突堤先端を超えて 東側へと粒径が大きな土砂が回り込んでいる状況が確認 された.図-13は突堤先端周辺の24点で行った粒度調査 から求めた平均粒径の平面分布を示すが、図に破線で示 すように、右(西)側から突堤先端へと細長い0.45mm 程度の粗砂の帯が形成されている.このように対象区域 の海浜変形については海浜縦断形の予測はほぼ可能とな ったが、粒径分布については課題が残された.再現性が 十分でなかった理由として、当海岸はリーフ海岸のため 干潮時完全な干出が起こり、かつ潮位変動が2.6 mもあ



図-12 G39 沖での砂の回り込み状況



るため,海浜変形に及ぼす潮位の影響が著しかったが, 本モデルではこの点が十分評価できていないためと考え られる.

5.まとめ

Sanur海岸の海浜変形がほぼ再現されたことから, Sanur海岸南部での侵食は,沖のリーフの掘削により波 の入射方向が変化した結果であることが明確になった. しかしながら粒径分布予測については課題が残された. その理由として,海浜変形に及ぼす潮位の影響が著しい ことが指摘できるが,このような点について検討するこ とがモデルの適用性を高める上で有効と考えられる.

参考文献

- 磯部雅彦(1986): 放物型方程式を用いた不規則波の屈折・ 回折・砕波変形の計算法,第33回海講論文集,pp.134-138.
- 宇多高明・大須賀 豊・大中 晋・石見和久・芹沢真澄・三 波俊郎・古池 鋼(2003):リーフの大規模掘削に起因 するバリアーの形成と海岸侵食,海岸工学論文集,第50巻, pp.1356-1360.
- 大中 晋・遠藤秀文・宇多高明・吉井一郎(2005) :リーフ 海岸における養浜工の設計・施工および養浜後の海浜応 答,海洋開発論文集,第21巻, pp.475-480.
- 野志保仁・小林昭男・宇多高明・熊田貴之・芹沢真澄 (2008) :粒度組成と個々の粒径に対応した複合平衡勾配 を考慮した海浜変形・粒径変化予測モデル,地形, Vol.29, pp.399-419.