Tuvalu Fongafale 島西岸における礫養浜計画の検討

Gravel Nourishment on West Coast on Fongafale Island in Tuvalu

宇多高明¹・大中 晋²・芹沢真澄³・泉 正寿⁴・三波俊郎⁵・宮原志帆⁵

Takaaki UDA, Susumu ONAKA, Masumi SERIZAWA, Masatoshi IZUMI
Toshiro SAN-NAMI and Shiho MIYAHARA

A plan of beach nourishment using coral sand and gravel on the lagoon side of Fongafale Island in Tuvalu was investigated. Field observation was carried out on June 5, 2012 and the formation of the composite slope of an offshore gentle slope covered with sand and a steep foreshore slope covered with gravel was confirmed. On the basis of this fundamental information, a method of gravel nourishment together with use of sand was investigated using the BG model. When two groins with 40m length and an interval of 185m were constructed along with beach nourishment, it was possible to recover the stable beach.

1. まえがき

Tuvaluは、地球温暖化に伴う海面上昇により水没の危機にあるとされている。しかし実際には、首都のあるFongafale 島への人口集中（2012年で約5000人）により海岸線近傍まで土地利用が進んだことから波浪災害を受け易くなり、同時に、住民と飼育されている約5000頭の豚のし尿処理がなされていないことから水質が悪化してサンゴ礁の健全な機能が失われるなど、人為的インパクトへの対処こそが課題となっている。とくに首都のあるFongafale 島では利用可能な土地が狭く、ラグーン側の海岸線近傍まで住宅地が迫ったため高潮位時における侵食や越波が見過ごすことができなくなった。これらへの対処法の検討にあたって問題となるのは、国土がサンゴ礁からなるため建設資材の調達が困難なことであった。一方、1972年10月にTuvaluに襲来したCyclone Bebe時には、大量のサンゴ礫が海岸へ打ち上げられたこと（Maragos et al., 1973）を考慮すれば、高波浪時に打ち上げられた礫材を周辺影響が起らない範囲で利用することも考えられる。このことから本論文ではFongafale 島西岸を対象としてサンゴ礁起源の礫と砂を用いた養浜手法について検討した。このためまず2012年6月5日には対象地域の現地調査を行った上で、芹沢ら（2006）のBGモデル（Bagnold概念に基づく3次元海浜変形モデル）を用いて検討した。

2. Fongafale 島西岸の対象地区の地形特性

Fongafale 島はTuvaluのFunafuti Atollに位置し、南北10 kmにわたって細長く伸びた洲島であり、首都もこの島にある（図-1参照）。Fongafale 島西岸のうち、図-1に示す矩形区域が本研究による養浜検討区域である。図-2はこの区域の2010年6月25日撮影の衛星画像を示す。衛星画像に明らかなように、西岸では海岸線近傍まで住宅地が迫っているが、海岸線には2か所に狭い砂浜がある。突

図-1 TuvaluのFongafale 島の位置

1	正会員	工博	一般財団法人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
2			日本工営(株) コンサルタント海外事業
本部
3	正会員	博(工)	海岸研究室(有)
4			双葉測量設計株式会社
5			海岸研究室(有)

図-2 Fongafale 島西岸（ラグーン側）の養浜計画地域の衛星画像（2010年6月25日撮影）

図-3 Fongafale 島西岸沖のホテル前の不透過栈橋から南側の突堤Aを遠望

図-4 不透過栈橋の北側に隣接する Viaku Lagi ホテル前の護岸

堤Aの南側隣接部と、中央部の長さ約470mの砂浜である。突堤Aの南側から続く砂浜は突堤で切れ、その北側には砂浜が全く存在しないことから、突堤A付近では全体に北向きの沿岸漂砂が卓越していると見られる。いま突堤Aの南側隣接部の平均汀線に対する法線を引き、その方向角を求めるとN300°Eとなる。

図-5 沖合の岩礁背後に形成された安定な砂浜

一方、中央部の砂浜は、沖合にある多数の岩礁背後で発達していることから、天然の離岸堤（岩礁）による波の遮蔽域に形成された舌状砂州であり、現況ではほぼ安定状態にあると考えられる。舌状砂州の北側に位置する矢印Bは、太平洋戦争中に米軍が建設したCatalina 飛行艇のRampであるが、その南側は掘削されたため局所的に水深が大きい。

3. 現地状況から学ぶ養浜の考え方

2012年6月5日の干潮時、養浜計画地であるFongafale 島中央部西岸の現地調査を行った。踏査は、図-2の点Pより北向きに移動しつつ行った。点Pには小規模な不透過栈橋が伸びており、そこから南側を望むと図-3のように長さ46mの突堤Aが伸びていた。この突堤は、北向きの沿岸漂砂を阻止しているため突堤北側の汀線は凹状で、磨耗の進んだサンゴ礫が満潮時汀線付近に集中的に堆積していた。一方、不透過栈橋の北側直近では図-4のように南側の突堤と不透過栈橋による沿岸漂砂阻止の影響が重なって現われたため、傾斜護岸の基礎が露出するまで侵食されていた。しかし、その北側では沖合の浅瀬による遮蔽効果により形成された砂の堆積域が遠望された。図-5は海浜が最も広い中央部の状況を示すが、主に中砂が堆積していた。さらにこの付近の満潮時汀線は、図-6のように径が数cmのサンゴ礫で覆われており、その勾配はほぼ1/3.5であり、礫の堆積域の沖側の砂の堆積域とはきれいな還急線で区分されていた。しかし砂浜は北側では次第に狭まって礫浜に変わり（図-7）、さらにその北側では図-8のようにコンクリート片が散乱した状態となっていた。そこで図-8に示す状況を養浜により改善できないかどうか検討することとなった。その際、現地海岸では、図-6のように砂と礫からなる複断面海浜が既に形成されていることから、これを参考として設計を行えば安定な断面形が創生可能と考えられ、また、砂礫の沿岸方向の移動は突堤により阻止すればよいと考えられた。

図-6 満潮時汀線付近に集積したサンゴ礫

図-7 砂浜の北端部

図-8 コンクリート片で覆われた養浜予定地

4. 計算条件

波浪場は、間瀬ら（1999）によるエネルギー平衡方程式法により計算した。また、地形変化計算には、芹沢ら（2006）によるBGモデル（Bagnold概念に基づく3次元海浜変形モデル）を用いた。計算時の潮位は、MHWS=CDL+2.8mとした。なお、TuvaluでのMSLはCDL+2.0mにある。波浪条件としては、Fongafale島のラグーン側に位置するFunafuti港における1999～2008年の風観測データを基にS-M-B法で推算した波浪データより

図-9 Fongafale島西岸沖の海底地形（2010年測量）

得られたエネルギー平均波浪の波高 $H=0.52\text{m}$ 、周期 $T=3.6\text{s}$ を用いた。地形変化計算では実測縦断面形を基に、バーム高 h_R を 1.2m （CDL+4.0m）、波による地形変化の限界水深 h_c を 1.8m （CDL+1.0m）とした。平衡勾配については、MSL以浅に堆積している礫斜面の勾配として $1/3.5$ （図-6参照）、MSL以深に堆積した砂斜面の勾配として $1/10$ （図-5参照）とした。なお、これらの平衡勾配に対応する底質としては径数cmの礫と中砂である。また、地形変化計算ではMLWS（CDL+1.2m）における水深 2m （CDL-0.8m）以深は固定床として扱った。境界条件としては計算領域の両端および沖端を横切る漂砂を0とした。

図-9は2010年実施の深浅測量結果を示す。基準面はCDL $\pm 0\text{m}$ に定めている。沖合には多数の礁が分布するとともに、Catalina Rampの南側の砂浜が残されている区域には汀線から伸びた広い浅瀬がある。深浅図の $X=1300\text{m}$ 付近にはCatalina Rampの残骸が残されている。再現計算における検証汀線は、1941年撮影の空中写真から読み取った値を対象とするが、1941年にはCatalina Rampは存在していなかったことから、再現計算では、Catalina Rampの突出部を取り除き、滑らかな等深線形状として波浪場を算出し、さらに地形変化計算を行った。一方、養浜時の予測計算では現況のCatalina Rampの突出部が残された状態で計算を行った。

地形変化計算では波向の設定が最も重要となる。前述のFunafuti港の風データによる波浪推算結果によれば、エネルギー平均波の入射波向は $N288.4^\circ E$ と得られた。しかしこの入射波向を与えれば実測汀線がそのまま再現可能とは限らない。そこで本研究では、実測値を参考としながらもtrial and errorの手法により最適波向を定めた。このため入射波向を種々変えて波浪場を計算し、その結

図-10 再現計算で与えた初期地形と入射波向N300°Eを与えて計算した再現地形

図-11 入射波向を5通り変えた場合の汀線形状と実測汀線形状の比較

果を用いて汀線形状を算出した上で、1941年の汀線形状を最もうまく再現できる波向を最適波向とした。入射波向の設定では、実測のエネルギー平均波向N288.4°Eとともに、N295°E～N310°Eを5°ピッチで変えた波向を設定して計算を行った。

5. 再現計算の結果

再現計算は、図-9に示す舌状砂州を囲む矩形領域を対象とし、1941年の汀線形状を再現することによって行った。Catalina Rampの突出部は1941年当時には存在していなかったことから、この突出部を取り除いて滑らかな等深線形状として波浪場の計算および地形変化計算を行った。図-10(a)は再現計算用の初期地形を示す。この初期地形に5方向から波を入射させて地形変化の計算を行っ

図-12 入射波向N300°Eを与えた場合の屈折係数と波向分布

た。例えば、図-10(b)は入射波向をN300°Eとして5年間波を作用させて求められた再現計算結果を示す。汀線付近が急勾配で、その沖が緩やかな勾配の海底面となるという計算結果が得られた。図-11は、入射波向を5通り変化した場合の汀線形状と、1941年の実測汀線との比較結果を示す。これによれば、実測汀線と最も適合する入射波向はN300°Eであり、Fongafale島のラグーン側沖での波浪観測によるエネルギー平均波の入射波向N288.4°Eよりも約12°北寄り傾いた角度であった。このことから以下の予測計算での入射波向はN300°Eとした。なお、この波向は図-2に示した突堤Aの南側隣接部の平均汀線に対する法線の方角N300°Eと一致した。

6. 養浜時の海浜変形計算

養浜時海浜変形計算では、現況のCatalina Rampがある地形条件下で、再現計算により得られた最適波向N300°Eで波を入射させて地形変化計算を行った。互いに185m離れた位置に突堤を配置して突堤間で矩形状に養浜を行い、波を作用させて静的安定形状を求めた。突堤は、南側にある砂浜をできるだけ保存すると同時に、北端ではCatalina Rampの南側隣接部にある深みを避ける位置に設置した。なお、過去の空中比較によれば、再現計算を行った図-9に示す砂浜は安定的に存在しており、ほとんど汀線変動も生じていないことから、対象区域の汀線にはほぼ直角方向から入射すると考えられる。また、養浜区域の両端に設置する突堤は沿岸漂砂を阻止することのみを目的とするために長さは最小限でよく、また直線状のため波の遮蔽効果はほぼ無視できる。よって計算においては、遮蔽効果を無視した。

図-12は最適波向N300°Eを与えた場合の屈折係数と波

図-13 養浜後の海浜形状予測

図-14 汀線形状の比較

向の分布を示す。波は汀線とはほぼ直角方向から入射するが、沖合の岩礁（浅瀬）では局所的に波高が高まり、その周辺では波高が低下している。この波浪場を与えて図-13(a)のように現況海岸線とほぼ平行に幅60m、初期海浜高を1.2m、初期勾配を1/2の盛土養浜として地形変化

図-15 衛星画像上に落とした予測汀線

計算を行った結果を図-13(b)に示す。図-12の波浪場に示されるように、養浜区域の沖合の1.0mの等深線が斜めに走り、北側で水深が大きいため、汀線付近に到達する波はやや右回りの方向となる。このため現況の海岸線と平行に養浜された汀線は、右回りに約3°回転し、5年後には安定形状に達した。図-14は汀線形状の比較を示す。図-14(a)は初期および予測汀線形状の比較、図-14(b)は図-13(b)に示す安定地形に対して波をさらに5年間作用させた場合の汀線変化を示す。波を作用させても汀線は変化しないことから汀線の安定性が確認できる。最後に図-15には2010年6月25日撮影の衛星画像上に予測汀線を重ね書きした結果を示す。予測汀線は現況を養浜量に応じて沖向きに平行移動した結果となった。

7. まとめ

Fongafale島西岸を対象としてサンゴ礁起源の礫と砂を用いた養浜手法について検討した。まず、2012年6月5日に実施した現地調査によれば、現地海岸での海浜の発達状況として、緩勾配の砂浜の陸側端に急勾配をなして礫が堆積し、この姿で安定している事実が確認された。そこでこれをヒントとして芹沢ら(2006)のBGモデルを用いて礫養浜について検討した。この結果、相互に185m離れた場所に長さ約40mの突堤を伸ばした上で養浜を行えば、現況で侵食された海浜を侵食以前の姿に復元可能なことが分かった。この手法では現地で入手可能な土砂を用いることから、その実現性が高いと考えられる。

参考文献

- 芹沢真澄・宇多高明・三波俊郎・古池 鋼 (2006) : Bagnold 概念に基づく海浜変形モデル, 土木学会論文集B, Vol.62, No.4, pp.330-347.
- 間瀬 肇・高山知司・国富将嗣・三島豊秋 (1999) 波の回折を考慮した多方向不規則波の変形計算モデルに関する研究, 土木学会論文集, 628/II 48, pp.177-187.
- Maragos, J. E., Baines, G. B. K. and Beveridge, P. J. (1973): Tropical cyclone Bebe creates a new land formation on Funafuti Atoll, Science, Vol. 181, pp. 1161-1164.