伊良部島長山の浜の侵食実態とBGモデルによる海浜安定化検討

Beach Changes of Nagayama-no-hama Beach on Irabu Island and Numerical Simulation Using BG Model to Stabilize Shoreline

宇多高明¹・宮原志帆²・宜保 勝³・勢理客 武³・奥間 章³
嶺井治男⁴・三波俊郎²・芹沢真澄⁵・菊池昭男⁶

Takaaki UDA, Shiho MIYAHARA, Masaru GIBO, Takeshi SERIKYAKU, Akira OKUMA
Haruo MINEI, Toshiro SAN-NAMI, Masumi SERIZAWA and Akio KIKUCHI

The Irabu Bridge connects Miyako Island to Irabu Island and it is now under construction. A causeway was constructed between the foot of the bridge and its central part using land reclamation method, resulting in formation of wave shelter zone on both sides of the causeway. After the construction of the causeway, marked beach changes occurred on the reef coast, and egg-laying sites of sea turtles were lost. The BG model was applied to investigate the stabilization method of the beach. Most suitable measure was to use groins as well as the beach nourishment.

1. まえがき

伊良部大橋は、宮古島とその西に位置する伊良部島を結ぶ橋梁であり、現在建設が進められている。この橋の伊良部島近傍の一部は、橋梁形式ではなく埋立方式で造られている。埋立部の長さはそのほぼ中央に70mの開口部を有して全体で670mである。伊良部島と宮古島の間の海峡部では主に冬季の北西方向からの入射波と、夏季の南側からの入射波の作用を受けるが、上記埋立地が造られたたことにより波の遮蔽域が形成された。従来、伊良部島の南東端に位置する長山の浜はこれら両方向からの波の作用を受けてバランスしていたが、埋立地の南側では北西方向からの波の作用がなくなり、南側からの波の作用のみとなって南部海岸から埋立地方面への沿岸漂砂が誘起された。一方、埋立地の北側では南側からの波の作用が埋立地建設による波の遮蔽効果により消失し、北西方向からの入射波の作用のみとなった。主として南側から沿岸漂砂によって運ばれた砂は埋立地の付け根に大きなトンボロを造って堆積する一方、南部では砂浜が削り取られビーチロックが露出する状況となった。長山の浜はアカウミガメの産卵地であったが、砂浜消失によって産卵地の消失が起きた。この状況の下で砂浜の回復と、伊良部大橋建設上の理由から橋梁取り付け部での堆

砂防止が求められている。本研究では空中写真や汀線測量データを基に海浜変形機構を分析するとともに、2010年9月6日には現地踏査を行い、これらのデータを基に芹沢ら（2006）によるBGモデル（Bagnold概念に基づく海浜変形モデル）を用いて対策案の検討を行った。

2. 伊良部島周辺の地形概況

1985年測量（海上保安庁水路部：No.6512-2）の海底地形図より切り出した伊良部島南東部の詳細海底地形を図-1に示す。海底地形図は、リーフの平坦面が2010年測量（沖縄県）、リーフ平坦面よりも外側は1985年測量（海上保安庁水路部：No.6512-2）であり、これらのデータを接合して新たに作成した。伊良部島南東部には幅が約1km、南北方向の長さが約1.8kmのリーフが発達している。リーフの平坦面の水深はほぼ3mである。伊良部大橋の南1kmには橋軸とほぼ平行にリーフエッジが伸び、そこで水深が8～10mまで急に落ち込んでいる。ま

図-1 伊良部島南東部の海底地形

1 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
2		海岸研究室(有)
3		沖縄県土木建築部宮古土木事務所伊良部
大橋建設現場事務所
4		岩下建技コンサルタント
5 正会員		海岸研究室(有)
6 正会員		(有)コストルテクノ

図-2 長山の浜の空中写真

たリーフエッジに沿って水深2mのクレストが伸びている。リーフエッジの外縁を滑らかな線で結び、その法線の方角角を読み取るとS38°Wとなる。リーフエッジの外側が急深であり、そこにほぼ直線状のリーフエッジが伸びていることを考慮すれば、東シナ海からの卓越波浪はほぼこの方向角を持って入射すると推定できる。また、このリーフエッジの東端にも深みがあり、この深みは北東方向に「ハ」の字形に開いている。このためほぼ南西方向からの入射波はこの深みを通過後、屈折して伊良部大橋方向へ向かうと推定できる。リーフ南縁ではリーフクレストの発達良好であるのに対し、伊良部大橋の北側ではクレストの発達はなく、伊良部島から東側では緩やかな傾斜で深くなっている。このように伊良部大橋を境とする、北東側と南側でのリーフ地形の相違は、伊良部島南東部にあっては主に南西側からの波浪作用が著しく、これによってリーフが発達してきたことを意味する。伊良部島南東部の長山の浜付近の詳細地形について調べると、-1mと-2mの等深線は海岸線とほぼ平行に延びるが、伊良部大橋の南西250m付近のC点付近では海岸線に対してこれらの等深線が突出している。この付近ではリーフの基盤面が露出している。

3. 空中写真の判読と汀線変化

長山の浜が写された空中写真を取得し、対象区域を拡大することにより空中写真の判読を行った。空中写真は1962年12月（米軍撮影：初回）、1972年3月、1977年11月、1986年10月、1994年9月、2006年7月、2009年5月、2009年12月の8時期があるが、例えば、初回の1962年と2009年5月の空中写真を図-2に示す。なお、各図では橋梁予定線と海岸線との交点にAを、Aの北側に550m離れた岩にBを、またAの南西450mにCを定める。まず図-2(a)で伊良部大橋の架橋予定線の北側区域の特徴を調べると、砂浜はAB間にのみ分布し、Bの北側は露岩域であった。またAB間では6箇所岩が突出していた。砂浜はこれらの岩のある場所では沖へ突出していることから、この当時岩の先端を沿岸漂砂が回り込むことが可能であっ

図-3 汀線変化 (1962～1986年)

図-4 汀線変化 (1986～2009年)

た。Aより南側ではCまではほぼ直線状の幅20mの砂浜が延び、Cで汀線の方角が急変するという砂嘴状の海浜であった。砂嘴状の砂浜が南側で狭まったあとでは広い砂浜はなくなり、突出した数多くの岩間に狭い海浜を残すのみであった。

伊良部大橋の建設が進んだ2009年5月には図-2(b)のように、伊良部大橋の埋立地が南側および北側からの波浪の作用を遮った結果、大橋の北側では南側からの波浪作用を受けなくなり、同様に大橋の南側では北側からの波浪作用がなくなった。この結果、伊良部大橋と伊良部島の海岸線との交点へと向かう沿岸漂砂が生じ、周辺域は侵食され、運ばれた砂が大橋の付け根に堆積することになった。結果的にAC間の海浜のうち大橋から離れた場所の砂浜は大きく狭まった。

空中写真からは前浜とリーフ面との境界線（遷急線）を明瞭に読み取れることから、以後この境界線を汀線と見なし、その位置を読み取った。図-3には1962年から1986年まで4時期の汀線を示す。1962年にはX=1800m付近に先端を持つ舌状砂州が形成されていた。しかし時間経過とともにこの舌状砂州は削り取られ、砂はA方向へと移動し平坦な汀線へと変わった。この場合、AC間では著しい汀線変化が見られるのに対しAB間での汀線変化はAの東側隣接部を除けば無視できる程度であった。同様に図-4には1986年から2009年12月までの汀線変化を示す。伊良部大橋建設後はC付近が大きく削り取られ、その砂が伊良部大橋の付け根にあるA付近へと移動した。

伊良部大橋建設後の2009年5月と12月において、伊良部大橋付け根の汀線のうち、南西側の汀線形状はほぼ一致を示す。また北東側の汀線は2009年12月では5月と比較して平行に前進している。これより、伊良部大橋の南西側の汀線はほぼ平衡状態に至っているが、砂の一部は大橋の

直下を越えて東側へと流出したこと、また北東側の汀線は変形しつつもその法線方向が卓越波向と直交していることを示す。そこで大橋の南西側の汀線の中点、および北東側の汀線の中点で法線を立て、その方向角を読み取ると、南西側部分ではS22°E、北東側ではN73°Eとなった。

次に、図-3、4において明瞭な汀線変化が認められる区間 ($X=830\sim 1950\text{m}$) を対象として、1962年を基準とした各年の海浜面積の変化量を算出した結果、海浜面積は1962年から1972年の間に急激に増加した後、1977年以降は $(5.8 \pm 1.2) \times 10^3\text{m}^2$ の値を有していた。図-4に示す1986年10月と2009年12月の汀線によれば、C付近での汀線後退と大橋の付け根のA付近での汀線前進が同時に起きていることから、両者から侵食面積と堆積面積を算出するとそれぞれ $9,600\text{m}^2$ 、 $10,700\text{m}^2$ となって両者はほぼバランスしている。またこの変化で注目されるのは、A付近での堆砂が起こる場合、Aの北東側での汀線は大きく変化しておらず、大部分の砂は南西側すなわちC付近から運び込まれていることである。現況で伊良部大橋の付け根は栈橋構造を有し沿岸漂砂は通過可能である。このため栈橋下部を通過してC側の砂が北東側へと運び込まれたと言える。

4. 前浜材料と縦断形変化

図-2(b) に示す伊良部大橋の南側隣接部の三角形の前浜において採取した海浜材料の粒度分析によれば、前浜砂の中央粒径は 1.3mm で、均等係数が2.49のよく淘汰された砂であった。粒度組成は、中礫 (2%)、細礫 (8%)、粗砂 (65%)、中砂 (25%)、シルト (0%) であり、大部分が粗砂と中砂で構成されていた。また前浜勾配は約 $1/10$ であった。

伊良部大橋建設前の2005年2月9日と、地形変化後の2008年3月8日の汀線測量の結果をもとに、図-2(b) に示すa～fの6測線における縦断形変化を調べた。図-5には代表的に侵食域の測線aと堆積域の測線fの縦断形変化を示す。なお各図の破線はリーフの基盤面を示す。著しく侵食が進んだ区域を横断する測線aでは、侵食前にはバーム高が 1.5m であったが、リーフの基盤面 ($Z=-0.8\text{m}$) から陸側、 $Z=2.6\text{m}$ までの間で侵食が進んだ。海浜と $Z=0\text{m}$ との交点はこの間 18m 陸側に移動した (以下、汀線変化量 Δy)。また海浜断面面積の変化量 (ΔS) は -42.2m^2 であった。なお侵食域の陸側では一部堆積が見られるが、これは侵食によって波のうちあげ高が増大し、砂がうちあげられたためと考えられる。一方、測線fではリーフの基盤面 ($z=-1.2\text{m}$) から陸側、ほぼ $z=2\text{m}$ までの間で堆積している。またバーム高は当初は 2m と高かったが、堆積が進むに従い 1m まで低下している。このようにして侵食域と堆積域で Δy と ΔS を求めた結果、 $\Delta S = 2.7\Delta y + 2.4$ と

図-5 縦断形変化 (2005年2月 vs. 2008年3月)

いう線形関係が成立することが分かった。両者の勾配は漂砂の移動高を与えるので、移動高 h は 2.7m となる。また縦断形からバーム高は 2m とすることができる。

既に伊良部大橋南側の侵食面積と大橋付近での堆積面積がそれぞれ $9,600\text{m}^2$ 、 $10,700\text{m}^2$ であることを示したが、これらの値に上記漂砂の移動高 2.7m を乗じると、海浜土砂量の変化量は $2.59 \times 10^4\text{m}^3$ 、 $2.89 \times 10^4\text{m}^3$ となる。平均土砂量は $2.74 \times 10^4\text{m}^3$ となった。

5. 分析結果の要約と対策の基本的考え方

長山の浜は伊良部島の南東端にあり、島の両側から侵入する波浪の作用を受けてきた。同時に沖合にはリーフが発達し、リーフ起源の砂供給があった。これとよく似た条件にあるのが宮古島の前浜である。前浜の場合、沖合は来間島があるため海岸線に対する法線方向からの入射波はなく、宮古島と対岸の来間島の間の水道部を通過する南東方向からの入射波と北西方向からの入射波の作用がバランスして砂州を形成していたが、台風襲来により波浪バランスが崩れて舌状砂州の移動が生じた (菊池ら, 2002)。長山の浜も前浜と同じ機構で動的平衡状態にあったと考えられる。しかし伊良部大橋の建設に伴い埋立地が造られて波の場が大きく変化し、波の遮蔽効果が顕著に現れた結果、大橋の南側では南側からの波の作用のみ、北側では北側からの波の作用のみとなった結果、橋の取り付け部方向への強い沿岸漂砂が生じた。これが海浜変形の原因と考えられる。

図-6を参照したとき、海浜変形は伊良部大橋の埋立地造成に伴って橋梁の付け根に波の遮蔽域が形成され、遮蔽域の外から内側へと、すなわちCからA方向への沿岸漂砂が起きたことに起因する。南西側の背後地が侵食されて砂が汀線へ供給されると、伊良部大橋の直下を沿岸漂砂が通過可能なうちは大橋の東側の汀線FGがF' G' のように前進するが、やがて大橋直下を漂砂が通過でき

図-6 対策検討の模式図

図-7 波高と波向の平面分布

($H_f=3\text{m}$, $T=12\text{s}$, $S38^\circ\text{W}$, $\text{H.W.L.}=E.L.+0.9\text{m}$)

なくなると、大橋の南西側の汀線DEがD'E'のように前進する。すなわち安定な汀線を形成するには沿岸漂砂を阻止する施設の南西側汀線をDEとほぼ平行にする必要がある。合理的な案は、DEとほぼ平行な汀線が形成されるようAC間に数基の突堤を延ばした上で、伊良部大橋の取り付け部の砂を除去し、突堤の南西側で養浜を行う手法と考えられる。

6. BGモデルによる対策案の検討

(1) 計算方法と計算条件

地形変化計算にはBGモデル（芹沢ら、2006）を用い、沿岸方向に800m、岸沖方向に500mの区域を対象とした。波浪場は、間瀬ら（1999）による不規則波を対象とするエネルギー平衡方程式法を用いて算出した。計算では碎波減衰項はDallyら（1984）のモデルを用いた。入射波の方向スペクトルについては、ブレッグシュナイダー・光易型周波数スペクトルと、光易型方向関数を組み合わせたもの（合田、1990）とし、方向集中度は $S_{max}=75$ 、周波数分割数は $N_f=3$ 、方向分割数は $N_\theta=16$ とした。碎波係数については、2009年の台風20号時において当海岸前面で実測された最大波高 $H=0.75\text{m}$ となるよう Γ 値（水平床での碎波限界波高水深比）を調整し、結果として $\Gamma=0.25$ と設定した。計算時の最小水深は $h_0=2\text{m}$ とし、陸岸域（地盤高 $Z \geq E.L.+2\text{m}$ 以上の地点）ではエネルギーを0と置いた。入射波条件としては、入射波高を $H_f=3\text{m}$ 、 $T=12\text{s}$ とし、波向は2で推定されたリーフエッジ外縁に直角方向となる $S38^\circ\text{W}$ とした。この波浪条件は、平良港沖の1989～2002年の波浪観測データによれば、年数回波（年

図-8 再現計算結果（伊良部大橋建設後の海浜変形）

間3日）に相当する。

計算では、まず伊良部大橋取り付け部建設前の自然状態の前浜を復元する現況再現計算を行い、その上で養浜を行うとともに離岸堤と突堤の配置と諸元を変えて5ケースの計算を行った。養浜では大橋取り付け部から採取した土砂 $V=32,000\text{m}^3$ を南側へと移動させた。ケース1は養浜のみ、ケース2～5でもケース1と同量の養浜を行うが、土砂流出防止のためにケース2ではT字突堤を含む離岸堤を設置し、ケース3、4、5では突堤諸元を変えて設置した上で養浜を行った。また、海浜変形は大橋の南側が侵食され、その土砂が伊良部大橋付け根へと移動、堆積することにより起きたものであるが、その際砂の一部は大橋直下を通過して北側へと流出したものの、形成された砂浜は伊良部大橋の橋軸と小さな角度を有する汀線を形成していることから、伊良部大橋直下に不透過の壁体を置くことでこれを模した。

(2) 現況再現計算

(1)で述べた計算条件のもとで現況再現計算を行った。まず、伊良部大橋の建設区域とその南側に広がるリーフを含む沿岸方向に2,900m、岸沖方向に2,400mの海底地形を与えて波浪場を計算した。潮位を $\text{H.W.L.}=E.L.+0.9\text{m}$ と設定し、入射波高3m、周期12sの波を $S38^\circ\text{W}$ 方向から入射させた結果を図-7に示す。沖合からの入射波は伊良部大橋の南側にある浅いリーフで減衰し、減衰した波が長山の浜の汀線に対して斜め入射となる。また大橋の付け根付近には、南東側にある深みからの波浪も斜め入射し、結果的に大橋の付け根方向への沿岸漂砂を誘起することが分かる。現況再現計算の結果を図-8に示す。斜め入射波のために図-8(a)に示す初期地形は直ちに南西部が侵食され、砂が大橋の取り付け部へと運ばれて図-8(b)のように三角形の前浜が形成された。図-9は汀線変化を示すが、汀線変化は初期に著しく進み時間経過とともに

図-9 汀線変化

図-10 計算結果と実測の汀線比較

図-11 波高と波向の平面分布(ケース4:養浜+長さ70mの突堤)

図-12 将来予測計算結果(ケース4:養浜+長さ70mの突堤)

図-13 汀線変化(ケース4)

緩やかになる。また図-10は実測と予測汀線の比較結果を示すが、両者はよく一致している。

(3) 対策案の検討

突堤長を変えたケースのうち、ケース3, 5では突堤長が短いため養浜砂の流出が起きた。そこで、ここでは最適案のケース4の結果を示す。このケースは、図-6に示すAC間に突堤を設置するもので、海岸線の方角角が大きく変わるC点付近に突堤を配置してその南側で砂浜を復元すると同時に、C点から北側300m区間の砂浜の回復と大橋取り付け部での堆砂防止を目指す案である。この場合、突堤法線を汀線に直角方向とするのではなく、来襲波の卓越波向を考慮して斜めとした。一方、C点より北側の海岸線はC点近傍では凸状であるが、その北側では緩やかな凹状になる。そこでこのような海岸線の特徴を考慮して突堤位置を設定した。具体的には、C点にL字突堤(先端部70m, 取付部50m)を設置し、C点の北120mで、海岸線が凸状から凹状へ変化する地点に突堤①(堤長70m)を、さらにそこから160m北に突堤②(堤長70m)を設けた。その上で伊良部大橋の付け根の砂を除去し、突堤の南西側で養浜を行った。図-11は波浪場の計算結果である。突堤の北側背後では波が静穏となる。この波浪条件のもとで図-12(a)のように養浜を行い、波を作用させた結果が図-12(b)である。さらに汀線変化

を図-13に示す。伊良部大橋側の2基の突堤間では砂浜が形成され、背後地の露出を防ぐことができる。

7. まとめ

養浜のみ、離岸堤+養浜、突堤などを用いた対策案の検討によれば、最適案は突堤を用いた場合であり、伊良部大橋側から堤長70mの突堤2基と堤長120m(先端部70m, 取付部50m)のL字突堤を160m間隔で設置した上で、伊良部大橋の付け根の砂を除去し、突堤の南西側で養浜を行えば目的をほぼ達成できることが分かった。

参考文献

- 菊池昭男・宇多高明・西隆一郎・三波俊郎・古池 鋼・芹沢真澄 (2002): リーフ海岸における海面上昇起源の急激な海浜変形—宮古島西部に位置する前浜海岸の例—, 海岸工学論文誌, 第49巻, pp.596-600.
- 合田良実 (1990): 港湾構造物の耐破設計: 鹿島出版会, p.303.
- 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, 土木学会論文誌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, 土木学会論文誌, 62B/II 48, pp.177-187.
- Dally, W. R., Dean, R. G. and Dalrymple, R. A. (1984): A model for breaker decay on beaches: Proc. 19th Inter. Conf. on Coastal Eng., pp. 82-97.