砂浜の維持管理における健全度指標

奥田 聡¹・渡辺 義²・田中隆洋³・平池智広⁴・片野明良⁵

¹国土交通省北陸地方整備局新潟港湾・空港整備事務所（〒951-8011 新潟県新潟市中央区入船町4-3778）
E-mail: okuda-s84u9@mlit.go.jp

²前国土交通省北陸地方整備局新潟港湾・空港整備事務所（〒951-8011 新潟県新潟市中央区入船町4-3778）
E-mail: watanabe-t84ve@mlit.go.jp

³前国土交通省北陸地方整備局新潟港湾・空港整備事務所（〒951-8011 新潟県新潟市中央区入船町4-3778）
E-mail: tanaka-t84ys@mlit.go.jp

⁴一般財団法人沿岸技術研究センター調査部（〒105-0003 東京都港区西新橋1-14-2）
E-mail: hiraike@cdit.or.jp

⁵正会員 株式会社エコ技術本部調査解析部（〒110-0014 東京都台東区北上野2-6-4）
E-mail: katano@ecoh.co.jp

砂浜は利用、環境性に優れた海岸保全施設と言える。長期的に砂浜を維持するためには、適切に維持管理することが重要である。砂浜を適切に維持管理するためには、健全度指標を明確にして、日々の点検を適切に実施する必要がある。砂浜の健全度指標の設定方法は確立されていないため、新潟港海岸をケーススタディとして健全度指標について検討した。砂浜の防護機能に対する海浜規模や海浜変形特性は個々の海岸で異なるため、健全度指標も個々の海岸で異なる。防護機能を満足する海浜規模は、波の打ち上げ高、越波流量の算定精度に影響されるため、算定精度を検証して海浜規模を設定する。砂浜は常に変形するため、要予防保全指標は、砂浜の長期的、短期的な変動特性を考慮して設定する。

Key Words : beach, maintenance, soundness indicators, corrective maintenance, preventive maintenance

1. はじめに

砂浜は来襲する波浪エネルギーを砕波などにより減衰させ、波の打ち上げ高を低くし、あるいは越波流量を減少させる消波機能、堤防等の洗掘を防止する機能等を有する。さらに、これらの海岸防護機能に加えて、海水浄化機能、生物の生息・生育環境を形成するなどの海岸環境上の機能、レクリエーション・スポーツ空間等の利用上の機能を有している。砂浜を適切に維持管理するためには、防護機能、環境・利用に関する砂浜の機能に対して健全度指標を設定する必要がある。しかしながら、砂浜の健全度指標の設定方法は確立しておらず、現状では個々の海岸で砂浜の変形特性を考慮して設定されていると考えられる。激しい侵食で砂浜を失った新潟港海岸を蘇らすため、面的防護方式（潜堤+突堤+養浜）による海岸保全が実施され、図-1に示す第1区画では2000年までに約50万m³の養浜を行った。本研究では、第1区画をケーススタディとして、主に、防護機能に対する砂浜の健全度指標を検討し、維持管理の基本的な考え方を示す。

2. 新潟港海岸の諸条件

(1) 防護対象施設

新潟港海岸は新潟西港の西側に隣接する約2.6 kmの海岸である。新潟港海岸の中でも整備が優先された第1区画は、2000年までに面的防護方式による海岸保全施設が

図-1 第1区画の位置と施設名称

概成している。その後、砂浜背後に海岸道路（市道中央3-176号線）が建設され、2005年に開通した。このため、面的防護方式による海岸保全は、海岸道路を防護するための機能が要求されるようになった。

(2) 地盤沈下

新潟市周辺では吉田^らが報告しているように、地盤沈下が継続しており、図-2に示すように現在でも約0.7cm/年の速度で地盤沈下が継続している。新潟港海岸の維持管理においては、地盤沈下の影響を考慮する必要がある。

3. 砂浜の変形特性

第1区画では、養浜地形の安定性を監視するために、2001年7月から現在まで年2回の頻度で深浅測量を実施している。図-3は第1区画の代表時期の空間平均断面地形（図-1, LineB）を示したものである。水深2m以浅の領域で2001年以降ほぼ一様に後退している。この特徴的な断面地形変化は、吉田^らが2001年から2007年までの汀線後退速度がほぼ一様に3.3m/年の速度で生じており、平衡断面に収束する変化と地盤沈下による断面応答による変化であると説明している。2007年以降の汀線の後退速度は1m/年程度と小さくなっており、断面地形は収束しつつあるものの、地盤沈下の影響もあり汀線後退は継続している。水深2mから8mまでの区間では2001年に凸地形であった地形が直線上に変化し、ほぼ安定している。なお、2007年以降は変化が少ないものの、水深2mから8mまでの区間で、直線形状から僅かに凹形状へと変化する傾向を示す。この変化は水深2m以浅の侵食量が小さくなり、沖側への土砂供給が減少したために生じたものと考えられる。この断面地形変化で着目される点は、後浜高3.5m、外浜外縁水深8m付近で変化が少なく、断面地形は、この2点をNode点としてその範囲内で変化している点である。なお、後浜高3.5m以上の領域における断面地形変化は飛砂による変形であり、波浪外力による変化は後浜高3.5m程度が上限となっている。

3. 砂浜の防護機能に対する要求性能

(1) 波の打ち上げ高の検討

砂浜の防護機能は、波の打ち上げ高を低減し、あるいは越波流量を減少させることである。そこで、砂浜の防護機能に対する要求性能として、波の打ち上げ高、越波流量を検討する。波の打ち上げ高を推定する方法は、複雑な海底断面に対して算定可能な中村^らの改良仮想勾配法が広く使われている。しかしながら、改良仮想勾配法では、海底勾配が1/20より緩勾配の海岸で過小評価す

図-2 地盤沈下の経年変化

図-3 断面地形の重ね合わせ図 (LineB)

る可能性が指摘されているため、複数の手法で算定し現地適用性を検討する。

a) 波の遡上高

新潟港海岸で波浪観測が実施され、かつ波の遡上痕跡が把握されている。2014年12月17～18日に発生した爆弾低気圧による波の打ち上げ高を再現することで算定方法の妥当性を検証する。

図-4は爆弾低気圧による時化時の新潟港海岸沖（図-1第1区画沖水深12m）の有義波高、有義波周期、平均波向の経時変化を示したものである。平均波向は新潟港海岸の汀線法線方向N325° Wを基準にして示している。有義波高は2014年12月17日18時に極大となり、 $H_{1/3}=6.7\text{m}$ 、 $T_{1/3}=11.8\text{s}$ となっている。波向は340°程度でありやや北から入射していた。新潟沖（NOWPHAS）の年最大有義波高の平均値（1989年～2016年）は約6mである。この時化の特徴は、有義波高の大きさだけではなく、潮位が非常に高くなったことである。図-5は新潟西港における天文潮位、実測潮位、潮位偏差の経時変化を示したものである。実測潮位は最大で60cm程度となり、天文潮位との偏差は概ね40cm程度あった。また、実測潮位の生波形（サンプリング間隔1s）の上限値から、潮位偏差は最大で60cm程度となっていた。この値は新潟西港内の値であり、潜堤背後の砂浜では潜堤背後の水位上昇や吹き寄せなどによる水位上昇が加わる。この時観測された新潟港海岸沖（水深12m）と潜堤背後（水深10m）の平均

図-4 新潟港海岸沖(水深12m)の有義波諸元

図-5 新潟西港の潮位

水位差は概ね35cm程度であった。これらのことから、新潟港海岸の平均水位は、新潟西港の天文潮位25cmに潮位偏差60cm、潜堤背後の水位上昇35cmを加えると、概ねC.D.L.+1.2m程度まで達していたと考えられる。

図-6は爆弾低気圧前の2014年10月8日に実施された横断測量結果と爆弾低気圧による時化後の2014年12月24日に実施された横断測量結果を示したものである。この時化により浜崖が形成されている。浜崖法先の地盤高はC.D.L.3m程度、法肩の地盤高がC.D.L.4m程度であり、高さ70～80cm程度の浜崖が形成されている。断面地形は空間的にばらつきがあるため、時化前後の空間平均断面から、後浜地形の変化点を算出した結果、遡上高は概ねC.D.L.+3.5m程度と推測された。

b) 波の打ち上げ高の再現

波の打ち上げ高をMase³⁾、Hunt⁴⁾、改良仮想勾配法により算定した結果を表-1に示す。算定条件は潜堤通過後の有義波高3.6m（換算沖波波高3.5m）、周期11.8s、潮位C.D.L.+1.2m、海底勾配1/35である。Mase、Huntは過大となり、改良仮想勾配法は過小になる。そこで、CADMAS-SURF/2Dにより波の打ち上げ高を再現する。CADMAS-SURF/2Dによる計算は、潜堤の伝達率を考慮して、潜堤通過後の有義波高が3.6mとなるように入射波条件を検定して行った。計算格子は $\Delta x=1.0\text{m}$ 、 $\Delta Z=0.5\text{m}$

図-6 爆弾低気圧前後の断面地形

表-1 波の打ち上げ高の算定結果

算定方法	打ち上げ高 (m)
Mase	C.D.L.+6.7
Hunt	C.D.L.+3.9
改良仮想勾配法	C.D.L.+3.1

(-4.0m以下)、 $\Delta Z=0.3\text{m}$ (-4.0m～-1.0m)、 $\Delta Z=0.2\text{m}$ (-1.0m以上)とした。図-7は波の打ち上げ高の計算結果を示したものである。計算時間に対して上位2%となる波の打ち上げ高はC.D.L.+3.6mとなり現地の打ち上げ高を良好に再現することができた。次に、CADMAS-SURF/2Dを用いて設計波に対して波の打ち上げ高を算定する。新潟港海岸の50年確率波は水深35m地点の有義波高9.3m、有義波周期14.3sである。潮位条件は、H.H.W.L.+0.88mに、高山ら⁵⁾の方法で潜堤通過後の水位上昇量(0.54m)を算定して設定した。設計波相当に対する波の打ち上げ高はC.D.L.+3.8mとなる。したがって、砂浜の後浜天端高はC.D.L.+3.8m以上に設定する必要がある。なお、設計波相当波に対する波の打ち上げ高を改良仮想勾配法により算定するとC.D.L.+3.3mとなり、約15%過小評価になる。爆弾低気圧時の再現でも同様に約15%過小評価になること

図-7 CADMAS-SURF/2Dによる波の打ち上げ高の計算結果

から、改良仮想勾配法による算定結果を15%割増せば波の打ち上げ高を算定することが可能である。

(2) 越波流量の検討

砂浜における越波流量は、高山ら⁹⁾の方法により算定した。新潟港海岸には砂浜背後に護岸がなく、道路（C.D.L.+4.0m）がある。このため、越波流量の算定においては、C.D.L.+3.8m地点に高さ0.2mの仮想護岸を設定し、越波流量を算定した。設計波相当に対する越波流量は $2.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$ となり、重要施設が背後にある場合の許容越波流量の目安となる $0.01 \text{ m}^3/\text{s}$ より2オーダー小さくなる。なお、設計波相当に対する越波流量が許容値を超える後浜天端高はC.D.L.+0.5m程度であり、波の打ち上げ高がクリティカルな条件となることが確認された。

(3) 要求性能を満たす砂浜の諸元

日山浜地区には護岸がないため、砂浜が最終防護施設となる。砂浜背後の海岸道路を守るためには、設計波相当波に対する波の打ち上げ高となる C.D.L.+3.8m 以上となるように、後浜天端高を確保すれば良いこととなる。しかしながら、波の打ち上げ高は、前浜、外浜地形が変化することで変動するため、砂浜の要求性能を満足するためには、海浜変形を考慮して砂浜の諸元を決定する必要がある。

4. 健全度指標

(1) 健全度指標に用いる断面諸元の選定

新潟港海岸で実施された冬季の砂面変動観測から、前浜勾配と外浜勾配がともに同時に急峻化することではなく、前浜が侵食され、前浜勾配が急峻化すると、外浜勾配は逆に緩傾斜化し、前浜で侵食された砂が外浜に一時的に堆積する地形変化が生じることが確認されている。砂浜の維持管理における健全度指標は、砂浜の目視点検により容易に判断できるものであることが望まれる。改良仮想勾配法の考え方よれば、砂浜の断面積が大きければ、波の打ち上げ高が低減する。このため、養浜砂の断面積を健全度評価にすることが考えられるものの、断面積を目視点検により評価することは困難である。そこで、**図-3**に示す断面地形変化から、後浜天端、外浜外縁地点が

図-8 汀線変化と断面地形変化の模式図

図-9 汀線変化と養浜土量変化の関係

Nodeとなることに着目し、**図-8**に示すように後浜高3.8m、外浜外縁水深8m地点が固定され、汀線が後退することで養浜断面積が縮小していると考える。

(2) 汀線変化量と養浜断面積変化の関係

汀線変化量を監視することで養浜断面積（養浜土量）変化を推定するためには、汀線変化量と養浜断面積変化とに高い相関関係が成立していなければならない。

第1区画では、養浜実施後に平衡断面に収束するための地形変化が2007年頃まで継続した。その後は海浜断面形状は安定しているものの、僅かながら汀線後退、養浜断面積の減少傾向が続いている。養浜後の初期変形期間を除いた2008年以降の汀線位置変化と土量変化の関係を**図-9**に示す。汀線位置の変化と土量変化の関係には明瞭な相関関係が認められる。このことから、汀線位置を監視すれば、砂浜の要求性能を評価するための養浜断面土量を把握できることが検証された。

(3) 事後保全指標の検討

汀線位置と養浜土量に明瞭な相関が確認されたことから、汀線位置から養浜断面積を算定して、波の打ち上げ高を算定することが可能となる。そこで、事後保全指標となる汀線後退限界を検討する。前述したように、CADMAS-SURF/2Dによる波の打ち上げ高と改良仮想勾配により算定した打ち上げ高の相関関係から、改良仮想勾配法により算定した波の打ち上げ高を15%割り増すことで、現地の波の打ち上げ高を評価する。

設計波相当の波浪が来襲した場合、汀線が20m後退すると波の打ち上げ高が海岸道路高（C.D.L.+4.0m）まで打ち上がる結果となる。したがって、事後保全指標としては汀線後退量が20m以上となった場合である。海岸道路に被害が生じてから事後保全する対応では、安全管理上の問題があり、かつ道路補修費などが必要となり、経済性の観点からも得策ではない。このため、予防保全型の効率的、効果的な維持管理が砂浜についても求められる。そこで、要予防保全指標を検討する。

(4) 要予防保全指標の検討

新潟港海岸では、地盤沈下の影響を含めてほぼ一様に汀線が約1m/年の速度で後退している。新潟港海岸では冬季の高波浪時に汀線が後退する。冬季は海上工事ができないため、予防保全事業に要する事業期間を考慮すると、5年程度の余裕を持たせておくことが望まれる。一方、前述した汀線後退量は年2回実施されている横断測量の結果を用いて算出しており、年単位の平均的な汀線後退量であり、高波浪が来襲する冬季の短期的な汀線後退量を考慮して要予防保全指標を検討する必要がある。

a) 冬季の汀線後退と来襲波高の関係

新潟港海岸で冬季に実施された横断測量は、2005年～2007年度にかけて合計17回、2014年12月の爆弾低気圧による時化後に1回ある。この横断測量結果を基に、時化後の短期的な汀線変動量を検討する。

2014年12月の爆弾低気圧による汀線後退は、2014年10月と2014年12月の横断測量から約5m程度（図-6）であった。この時化の極大有義波諸元は、 $H_{1/3}=6.7\text{m}$ 、 $T_{1/3}=11.8\text{s}$ である。次に、2005年～2007年度にかけて実施された冬季横断測量のうち、短期間に高波浪が複数来襲した2006年度の汀線変動に着目する。図-10は2006年度冬季に実施された横断測量結果を基に算定された汀線位置と新潟沖(NOWPHAS)の有義波高の経時変化を示したものである。2006年12月29日に有義波高7.6m、有義波周期11.6sとなる時化が来襲し、約1週間後となる2007年1月7日に有義波高8.3m、有義波周期12.2sの時化が連続して発生している。横断測量は2006年12月20日と2007年1月11日に実施

されており、その間の汀線後退は約4.5mであった。大きな時化が連続したにも係わらず、汀線後退量は2014年12月の単発の時化時の汀線後退と同程度であった。加藤ら⁷⁾は波崎海岸で1日1回実施された横断測量結果をもとに、汀線後退量は来襲波浪エネルギーと、その波浪エネルギーを受けた汀線位置が関係することを示している。つまり、高波浪により汀線が後退し、高波浪に対して安定海浜断面に変形した後に、高波浪が来襲しても汀線後退が生じ難いことが示唆される。そこで、2016年12月21日～2017年2月9日までの間に、インターバルカメラを用いて1時間毎に前浜の地形を撮影し、冬季高波浪時の前浜地形を連続的に監視した。図-11に示すようにLineB測線で地盤高約2mと2.4m地点にメモリポールを設置し、2地点の砂面高を読み取り、その経時変化を図-12に示す。図は上からAMeDAS新潟における気圧、新潟港海岸沖（水深12m）の有義波諸元、2地点の砂面変動を示している。図中に緑色線、青色線、橙色線、桃色線で示す4時期に

図-11 前浜地形変化把握地点 (LineB)

図-10 有義波高と汀線位置変化の経時変化

図-12 気圧、有義波高と地盤高変化の経時変化

表-2 新潟港海岸の砂浜の維持管理における健全度指標

	A(要事後保全)	B(要予防保全)	C(要監視)	D(問題なし)
汀線後退量	20m以上	15m～20m	10～15m	0～10m
後浜天端高	C.D.L.3.8m未満	C.D.L.3.8m	C.D.L.3.8m以上	C.D.L.3.8m以上
外浜外縁水深	8m以上	8m	8m以下	8m以下

Point1で地盤高が顕著に変動した。観測期間中には地盤高約2.4m地点のPoint2の地盤高はほとんど変動しておらず、Point2までは波が遡上しなかったことが分かる。地盤高変動が生じたPoint1の地盤高の経時変化に着目すると、時化の発達期まで地盤高が低下し、最盛期から減衰期には、回復する傾向が確認できる。12月24日前後の時化で地盤高が低下し、その後、堆積、侵食を繰り返し、2月2日、2月7日に最初の時化と同規模の波浪が来襲しても地盤高変化は少ないことが確認された。したがって、短期的な汀線後退量を考慮しても新潟港海岸にける予防保全指標は、事後保全指標に5mの余裕を見て、汀線後退量15m程度が妥当であると考えられる。

(5) 砂浜の健全度指標

新潟港海岸における砂浜の健全度指標は、表-2に示すようにまとめられる。波の打ち上げ高と汀線後退の関係は、外浜外縁水深8m、後浜天端高3.8mをNode点に設定しているため、汀線後退量に合わせて、このNode点の地盤高についても健全度指標に含める必要がある。

5. おわりに

本研究の主要な結論を以下に示す。なお、砂浜の短期汀線変動量には自然条件などの不確実性も含まれることから、新たな知見が得られた段階で砂浜の維持管理計画にフィードバックさせることが課題となる。

(1) 砂浜の断面地形は、波浪等の外力が作用する陸側境

界となる波の打ち上げ高となる位置、移動限界水深に対応する外浜外縁水深までの範囲で変化する。

- (2) 現地の波の打ち上げ高は、CADMAS-SURF/2Dによる再現性が良好であった。改良仮想勾配法を適用する場合には、打ち上げ高を概ね15%割り増しすることで算定可能である。
- (3) 砂浜の維持管理における健全度指標は、要事後保全、要予防保全を長期的な汀線後退、および短期的な変動特性を考慮することで設定される。

参考文献

- 1) 吉田秀樹、二瓶章、金井実、長谷川巖、片野明良、山田貴裕: 汀線付近の集中的な侵食と地盤沈下、土木学会論文集B2(海岸工学), Vol. B2-65, No.1, pp.721-725, 2009.
- 2) 中村充、佐々木康雄、山田穰二: 複合断面における波の打ち上げ高に関する研究、海岸工学論文集、第19巻, pp.309-312, 1972.
- 3) Mase, H.: Random wave runup height on gentle slope, Journal of Waterway Port, Coastal, and Ocean Eng., ASCE, Vol.115, No.5, pp.649-661, 1989.
- 4) Hunt, I. A.: Design of seawalls and breakwaters, Proc. ASCE, Vol.85, No.WW3, pp.123-152, 1959.
- 5) 高山知司、池田直太、永井紀彦、高山優: 広天端幅潜堤の越波低減効果に関する不規則波実験、海岸工学論文集、第35巻, pp.587-591, 1988.
- 6) 高山知司、永井紀彦、西田一彦: 各種消波工による越波流量の減少効果、港湾技術研究所報告、第21巻第2号, pp.151-205, 1982.
- 7) 加藤一正、柳嶋慎一、村上裕幸、末次宏児: 短期汀線変動のモデル化の試み、第34回海岸工学講演会論文集, pp.297-301, 1987.

(2017.3.15 受付)

SOUNDNESS INDICATORS FOR SANDY BEACH MAINTENANCE

Satoshi OKUDA, Tadashi WATANABE, Takahiro TANAKA, Tomohiro HIRAIKE
and Akiyoshi KATANO

Sandy beach is situated as a shore protection facility from the view of utilization and natural environment. Appropriate maintenance of sandy beach is important to preserve in the long term. To carry out daily checkup to preserve beach appropriately, soundness indicators for beach maintenance are required. However, the soundness indicators have not been established, so far. As a case study of the beach controlled by Niigata Port, soundness indicators are investigated. The soundness indicators depend on individual beaches, in which beach scale against shore protection function and beach deformation characteristics are different beach by beach. The beach scale to fulfill the conservation function is determined by wave runup and wave overtopping, so that the beach scale is set by verifying precision degrees of above two factors. Due to the beach deformation each and every time, preventive indicators for shore maintenance are established in consideration of beach deformation characteristics in long-term as well as in short-term.