

南九十九里浜 BMS 工法の侵食防止効果と地下水特性の現地調査

西村 晋*・宇多高明**・国栖広志***

1. 緒 言

BMS 工法 (Beach Management System) は透水性の集水管を汀線と平行に埋設して地下水を排水し, 海浜部に不飽和状態を形成して砂を定着させ, 海岸侵食の低減を図る地下水低下工法の一つである。海外ではデンマークや米国などで施工実績があり, その堆砂および侵食防止効果が報告されている (Vesterby, 1991)。国内では茅ヶ崎海岸で実施され現地観測結果が報告されている (西村ら, 1998)。本工法は既存の工法に比べて, 構造物を地中に埋設するので渚を自然の状態に保つことができることから景観を損なわないといった特徴を有している。

地下水低下工法は, 海浜部を不飽和状態とすることにより, 遡上した波の一部を浸透させて戻り流れを弱め, 浮遊状態の砂を捕捉・堆積させることにより侵食防止を図る工法である (土屋・河田, 1980; Parks, 1989; 佐藤ら, 1992)。この場合, 集水管の設置位置は佐藤ら (1992, 1995) によると, ポンプによる強制排水試験から, 汀線 (M.W.L.) より沖側に設置した方が良いとの報告がある。岸側に設置した集水管は, 波の遡上状態によっては空気を吸引するため効率が低下する。これに対して, 沖側に設置した集水管は, 水中に完全に没水するため安定した吸水効率が得られると説明されている。また, ポンプ性能を上げて集水量を増すことにより, 侵食性の波浪条件下でも堆積性に転じうることを示している。一方, 福島ら (1997) も集水管を沖側に設置した方が侵食防止効果のあることを, ポンプによる強制排水試験から示した。この理由として, 砕波帯に設置した集水管による吸水は, 砕波による間隙水圧の上昇を低下させ, 砂の締め固め効果が期待できるとの考えを示している。

しかし, 現地では潮位変動があり, 例えば海浜勾配が 1/30 で潮位差が 2 m とすると, H.W.L. と L.W.L. での汀線の位置は水平距離で 60 m も変化する。また, サーフゾーンでは沿岸漂砂も活発であり, 離岸流の発生など複

雑な流況が生じる場所でもある。このような場所に, 集水管を設置することは, 構造物の機能や安定性を確保するための設置位置の選定が問題になる。一方, 海浜部の地下水は海水だけでなく陸域の淡水が存在する, このため海水と淡水の地下水位の挙動を把握することは BMS の水位低下を効果的に行うために重要である。

そこで, 本検討では設計法の確立を目的に 1997 年 4 月から 1999 年 3 月までの 2 年間, 千葉県九十九里浜において現地実証試験を実施した。集水管の敷設本数は 1 条敷設が一般的であるが, 本検討では潮位変動も考慮して, 幅 30 m, 距離 200 m の範囲に 4 条の集水管を敷設した。

本検討は, 地形測量および波浪との関係から BMS の侵食防止効果について検討するとともに, 岸沖方向に設置した観測孔での計測結果から地下水位の変動特性および侵食防止効果および集水に伴う海岸近傍の塩分濃度分布の変化について報告する。

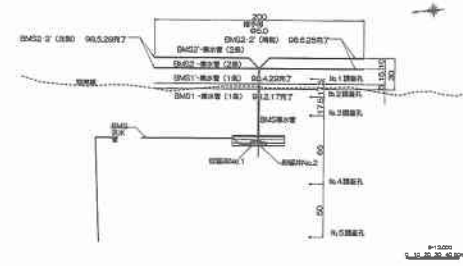
2. 現地試験概要

BMS の現地試験は図-1 に示すように千葉県九十九里浜に位置する長生村一松海岸で行った。一松海岸は一宮川河口北側に延びる延長 4 km の砂浜海岸である。この付近の沿岸漂砂の卓越方向は北向きであり, 太東岬の海食崖の崩壊土砂がこの沿岸漂砂によって北向きに運ばれ, 九十九里浜の中央部に位置する片貝漁港まで運ばれる (宇多, 1997)。しかし, 太東岬の海食崖の侵食対策や, 一宮川を挟んで南側に位置する一宮海岸におけるヘッドランドの建設にともなって, 北向きの漂砂量が減少し, 一松海岸は長期的には侵食性の海岸となっている。

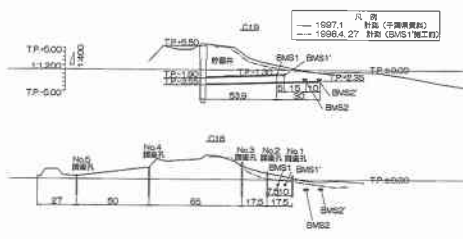


図-1 九十九里浜 (一松海岸位置図)

* 正会員 財団法人土木研究センター 研究開発一部
** 正会員 工博 建設省土木研究所河川部長
*** フェロー 工博 財団法人土木研究センター 研究開発一部



(1) 平面図



(2) 断面図

図-2 BMS 設置状況 (一松海岸)

一松海岸は、前浜勾配が約 1/30 で汀線より沖側が約 1/50 と比較的緩やかな海浜勾配である。汀線付近は中央粒径が 0.26 mm, 均等係数 1.5, 透水係数 $2.0 \times 10^{-2} \text{cm/s}$ のほぼ均一な粒径の細砂である。設計潮位は H.W.L. T.P.+0.836 m, L.W.L. T.P.-1.134 m である。

集水管は直径 30 cm の透水性の高密度ポリエチレン管である。図-2 に示す岸側の 2 列 (1, 1') は 1 条の集水管を敷設したもので手前側から順に 1998 年 2 月 17 日, 4 月 29 日に設置が完了した。沖側の 2 列 (2, 2') は 2 条の集水管を敷設したもので 1998 年 6 月 25 日まで完了した。集水管の設置位置は、図-2 の断面図に示すように岸側 2 列が T.P.-1.3 m, 沖側 2 列が T.P.-2.35 m である。2 本の集水井のうち、岸側の 2 条を集水井 1, 沖側の 2 条を集水井 2 に自然流下させた。井戸の水位は所定の範囲に設定し、30 Kw および 37 Kw のポンプを用いて、自動制御で行った。

ポンプの運転にあわせて、BMS 設置区間を含む 600 m の範囲を 1 回/月の割合で地形測量 (測線 C15~C23: C19 が BMS の中央) を行うとともに調査孔を岸沖方向に 5 本配置して、地下水位や塩分濃度などの観測を行った。

波浪外力は、調査地点の北約 20 km に位置する片貝漁港 (水深-10 m, 超音波波高計) のデータを用いた。

3. 観測結果

集水管の敷設は 1998 年 7 月に完了し、本格的なポンプ運転を開始した。ポンプは順調に運転され、揚水量は 2 基併せて時間当たり約 900 m³ の海水が得られた。

(1) 海浜地形変化

1998 年 6 月から 9 月までの、調査孔 No.1 (沖側) および調査孔 No.2 (1 より 17.5 m 岸側) での地盤高と有義波高の経時変化を図-3 に示す。地盤高は 6 月 26 日を基準としてその変化量を整理した。この図によれば、No.1, No.2 とともに 6 月 26 日から 7 月 6 日までの期間、また 7 月 23 日から 8 月 20 日頃までに海浜地盤の上昇が見られる。しかし、7 月 23 日以降の地盤高の変動では岸側にある No.2 でまず海浜地盤高の上昇が飽和状態となり、それに遅れて No.1 での地盤高が上昇している。このことは、BMS の設置区間では、堆砂が岸側から順に飽和したことを示している。海浜地盤高の上昇量は、No.1, No.2 でそれぞれ 1.5 m, 1.3 m であって沖側の測点のほうが大きい。一方、海浜が侵食される場合には、No.1, 2 とともにほぼ同時に地盤高の低下が起きている。有義波高との対応を調べると、海浜地盤高の上昇は有義波高が 1 m 以下と比較的静穏な波浪状態が継続したときに起きている。一方、8 月 30 日には台風 4 号に伴って 4 m 以上の高波浪が来襲し、侵食が急激に進んでいる。

BMS 設置前後の海浜状態の相違が写真に残されている。写真-1 は BMS 設置区間の中央部南約 5 m の位置で、6 月 2 日 16 時に撮影したもので、北向きに海浜を望んでいる。写真に示すように、BMS の試験が行われる前には緩やかな前浜勾配の海浜が発達していた。同じ場所から 7 月 9 日 10 時に撮影したのが写真-2 である。この時期には顕著なバームの発達が見られる。一般に、静穏な波の条件下では、汀線付近で堆砂が生じてバームが形成され、高波浪時にはバームが侵食され削り取られる。従って図-3 および写真-1, 2 に示す海浜地盤高の変化は、BMS の効果と無関係なこともあり得る。BMS が堆砂効果を発揮したのであれば、BMS 周辺で著しい堆砂が観察されなければならない。この状況を調べるために空中写真撮影を行った。写真-3 は BMS 試験区間の南約 500 m, 高度約 120 m の位置から 8 月 28 日午後 2 時に撮影したものである。撮影時は干潮で、潮位は T.P.-1.0 m である。

写真-3 は、台風 4 号に伴う高波来襲直前で、海浜が最も堆積している時期の写真である。写真には BMS の設

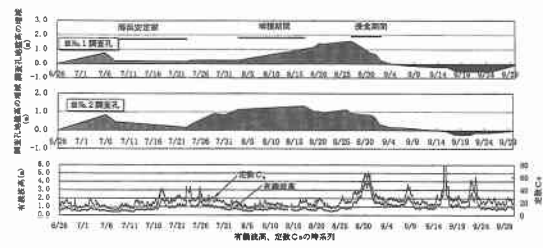


図-3 波浪と調査孔 1, 2 の侵食堆積状況



写真-1 BMS 設置前の海浜状況 (6月2日 16時)



写真-2 BMS 設置後の海浜状況 (7月9日 10時)



写真-3 BMS による堆砂状況 (8月28日午後2時)

置状況も示しているが、周囲の直線的な海岸線に対して BMS の設置区間の汀線が大きく半円形状に突出していることが分かる。仮に BMS の設置が無ない条件で、半円形状に突出した状態の汀線に波が作用すれば、汀線は平坦になるはずであるから、この写真は BMS の堆砂効果を明瞭に表している。

図-3 に示す海浜地盤高の変化によれば、侵食されて地盤高が低下する期間、堆積して地盤高が増加する期間、侵食も堆積も起こらず地形変化の見られない期間に大きく分けられる。そこで、それぞれの期間について、有義波高と周期の関係を図-4 に示す。これによれば、堆積期間の波浪は、波高がほぼ 1 m 以下、周期が 9 秒以下の条件である。一方、侵食期間では波高が 1.5 m 以上で、周期が 8 秒以上と高波浪・長周期の条件である。また、海浜安定期間は波高が 0.5 m から 2 m であって、周期は堆積期間とほぼ同等である。

波浪の安定化指標は、堀川・砂村によると汀線付近の侵食・堆積特性は C_s 値により判定可能であり、一般的な現地砂浜海岸では $C_s = 18$ が侵食と堆積の境界とされている (例えば、本間・堀川, 1985)。

$$H_0/L_0 = C_s (\tan \beta)^{-0.27} [d/L_0]^{0.67} \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 H_0 : 沖波波高、 L_0 : 波長、 C_s : C_s 値、 β : 浜勾配

このことから、BMS 運転中の地形変化に関して式 (1) の C_s 値の変化について侵食・堆積の境界値はほぼ

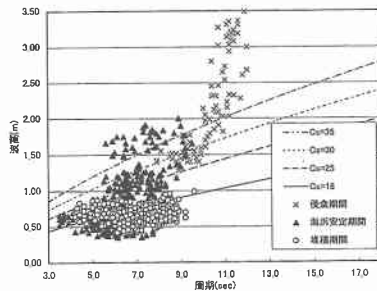


図-4 BMS 設置に対する海浜安定係数 C_s 。

25 であって、この値は通常の境界値に比べて約 40% 大きい。このことから、BMS の運転によって侵食・堆積の境界値が通常の自然海浜に比べて増大したことが分かる。

(2) 汀線変化

図-5 に BMS 周辺の汀線変化を示す。汀線変化は、BMS の運転を開始した 6 月 26 日を初期値として算出した。測線の配置は、上段に示すように測線 C17 から C21 が BMS 設置区間であり、C17 が南端に C21 が北端に位置する。両者の距離は 200 m である。これによれば、まず 7 月 8 日までに BMS 施工区間の南側半分で汀線が前進している。

夏季にはこの海岸では北向きの沿岸漂砂が卓越するが、この時の汀線の前進パターンは、あたかも C19 に突堤があり、そこで南側から運ばれてきた砂が阻止されているかのような堆積状況を示している。しかし、突堤であれば C19 から北側では汀線が後退するはずであるが、BMS では汀線の著しい後退は生じていない。その後、8 月 21 日には、汀線の前進域が北側へと広がった。この時、汀線の前進域は北側へとスライドするような変化が起きている。また、汀線が最も前進したのは BMS の設置区間である。このように前進した汀線も、8 月 30 日に襲来した台風 4 号の高波浪によって大きく後退した。一連の汀線変化は、BMS の設置位置に、あたかも見えない突堤が

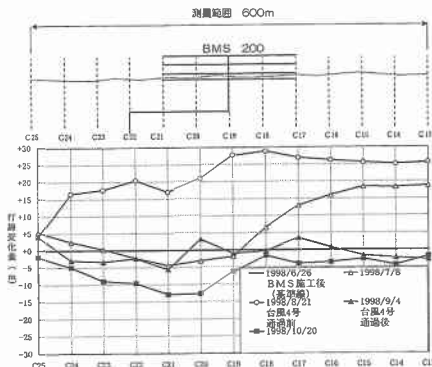


図-5 BMS 稼働時の汀線変化

あるかのような汀線変化を示している。

(3) 海浜断面の変化

BMS設置区間の中央を通る測線C19と、そこから南北に200mずつ離れた測線C15とC23の海浜縦断形の比較を通じて、BMSが海浜縦断面に及ぼす影響について調べた。ここでは、BMSの中心と両側に同じ距離だけ離れた測線の海浜縦断形の変化を比較することにより、BMSの堆砂効果と沿岸漂砂による地形変化への影響が明瞭になると考えた。図-6にはC15, C19およびC23の海浜縦断形の変化を示す。縦断形の基準は1998年6月26日の形状とし、それに対して侵食が起きた部分をハッチで示す。これによれば、7月8日ではC19の測線は、他の測線に比較して顕著なバームの発達が見られる。バーム頂での地形変化量は約1mである。C15やC23と比較してBMS設置区間の中央においてバームの発達が良好である点は、岸側の集水管の効果が著しく現れたことを表していると考えられる。7月23日ではいずれの断面でも侵食が著しく、6月26日の縦断形にはほぼ戻っている。これは、測量直前の7月18日に約2mと比較的高波浪が来襲したためである。しかし、その後は静穏な波浪条件が続いたため、8月21日にはBMSの設置区間を中心として幅広い区域で堆砂が進んだ。最大の堆砂が見られた場所は、岸側の集水管の設置箇所付近であり、最大地盤高の上昇量は約1.5mに達した。しかもBMSの設置区間で堆砂が著しく、両側に離れると堆積量が減少している点は、BMSの効果を表しているものと考えられ

る。

(4) 地下水位の変動

地下水位の連続観測データより、特徴的な変化の見られた時期を選定して波浪・潮位と地下水位の時系列変化について調べた。図-3によれば7月22日から7月末までに測点No.2において急速な堆砂が見られた。この時期の地下水位変動として、7月15日から7月31日までの波高・周期・潮位・地下水位の変動を示すのが図-7(1)である。外海潮位に遅れて地下水位が周期的に変動し、その振幅は陸側ほど小さくなっている。また、7月18日には波高2.0m、周期8.9sの波浪が来襲したために、地下水位の急激な上昇が生じている。

同様に、図-7(2)には台風4号による高波浪が来襲した時期を挟む、8月25日から9月4日までの波高・周期・潮位・地下水位の経時変化を示す。高波浪の来襲前の8月28日までは地下水位が低かったが、高波浪の襲来とともに地下水位の上昇が著しい。

BMSによる吸水による海浜部の地下水位は、汀線付近で最大1.1m程度の低下を示していることが確認された。しかし、長周期の波が来襲すると地下水位の低下はほとんど認められなかった。

(5) 地下水塩分濃度の変化

図-8はBMSの運転、停止時に測定した地下水の塩分濃度の鉛直分布である。BMSの運転時としては、1998年7月13日12時の干潮時(潮位T.P.-0.6m)の測定値を、また停止時としては1998年7月10日午前9時の下

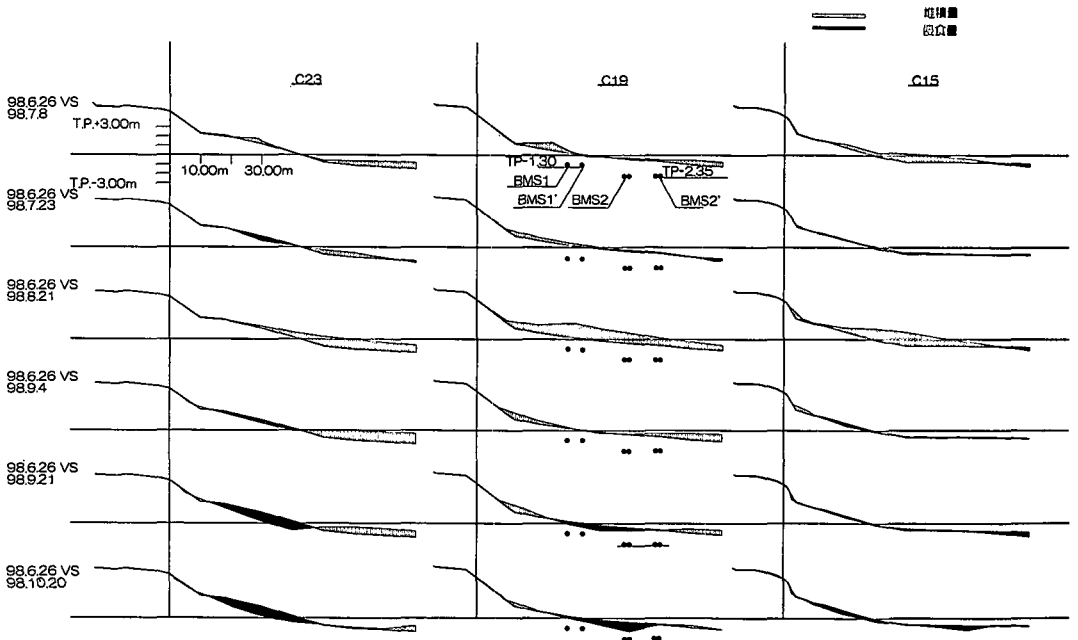
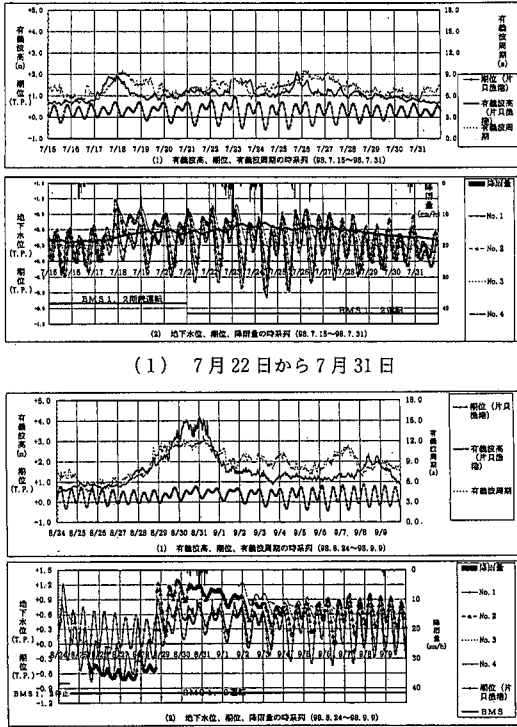


図-6 BMS稼働時の海浜断面形の変化



(1) 7月22日から7月31日

(2) 台風4号来襲前後(8月25日から9月4日)

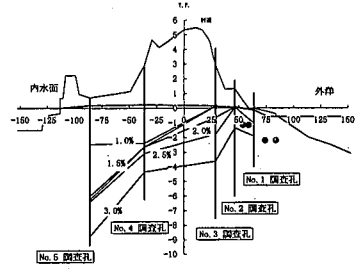
図-7 地下水位変化

げ潮時(潮位 T.P.-0.6 m)の測定値を示している。No. 1 から No. 4 の調査孔の順に陸側に位置するため、外海潮位に対して地下水位の振幅が減少するとともに、位相の遅れが見られる。図-8 に示す塩分濃度の断面分布によれば、BMS の運転により海側から陸側への塩分の侵入が増加し、塩淡水境界面が陸側に移動し、No. 1 調査孔では停止時と比較して地下水位が低下したことが分かる。

4. 結 言

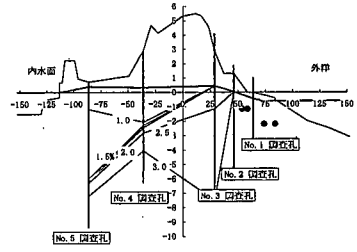
- 1) BMS の現地試験によれば、前浜の侵食・堆積を判別する安定化指標である C_s 値は 25 程度となり約 40% 上昇する。
- 2) 地下水位の観測によれば、地下水位の低下量と侵食・堆積は密接な関係があり、取水能力を算定する上で重要なパラメータである。
- 3) 調査孔の塩分濃度の調査によれば、海水と淡水の混合域が拡大することから、取水の利用目的に応じて集水管の設置位置を選定する必要がある。

謝辞：本調査にあたり、南九十九里浜 BMS 検討委員会においては千葉県土木部河川海岸課および千葉県長生



(1) BMS停止時(8月7日10 下げ潮時・潮位 T.P.-0.6m)

(1) BMS停止時



(2) BMS運転時(8月7日13 干潮時・潮位 T.P.-0.6m)

(2) BMS運転時

図-8 地下水の塩分濃度分布

土木事務所、長生村、また、資料のとりまとめに当たっては日本海洋コンサルタント(株)のご協力をいただきました。記して謝意を表します。

参 考 文 献

宇多高明(1997): 日本の海岸侵食, 山海堂, 442 p.
 佐藤道郎・秦 慎勝(1992): 前浜地下水の吸水による海浜変形の実験, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 336-340.
 佐藤道郎・福島正寛・西隆一郎・福永雅彦(1995): Coastal Drain による漂砂帯の流況変化と断面変化について, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 716-720.
 土屋義人・河田恵昭(1980): 浜漂砂に及ぼす吸水の影響について, 海岸工学論文集, 第27巻, pp. 270-274.
 西村 晋・宇多高明・平野浩一・渡辺 敏(1998): 茅ヶ崎海岸におけるBMSによる地下水位低下の現地実測, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 646-651.
 平野浩一・千田昌平・和田信昭・宇多高明・見附敬三(1997): 茅ヶ崎海岸におけるBMSの被災原因とその改良方策, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 981-985.
 福島雅紀・西村仁嗣・木村孝次: 地下水位低下工法による海浜安定化のメカニズムに関する一考察, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 666-670.
 本間 仁・堀川清司編(1985): 海岸環境工学, 東京大学出版会, 582 p.
 Parks, J. M. (1989): Beachface dewatering: A new approach to beach stabilization, THE COMPASS, Vol. 66, No. 2, pp. 65-72.
 Vesterby, H. (1991): Coastal drain system—a new approach to coastal restration, Proc. of Int. on Geotech. Eng. for Coastal Development, pp. 651-654.