

改良型ウェルポイントによる海浜安定化の現地実験

橋 詰 正 広* ・ 鈴 木 和 重** ・ 水 谷 俊 孝***
金 子 典 由**** ・ 歌 川 紀 之**** ・ 西 村 仁 嗣*****

1. はじめに

近年の海岸管理では、海岸の後背地を波浪や高潮から守るという目的だけではなく、海浜固有の自然環境の保護や海岸の有効利用という目的を含めて、計画を進める機会が多くなっている。遠浅の砂浜海岸において、十分な前浜の面積を自然な状態に保ち(自然環境の保護)、静穏時には、海水浴などのレジャー空間として利用し(海岸の有効利用)、荒天時には遡上波のエネルギーをそこで吸収し、後背地を守る(海岸保全)方法が近年模索されている。そのような方法の一つとして、「地下水水位低下による海浜安定化技術」が注目されている。本技術のメリットは、構造物を海浜上に設置する必要がないため、景観も良好に保つことができる点にある。

地下水水位低下による海浜安定化技術としては、「強制浸透による浜漂砂制御工法」(Chappell ら, 1979)、「透水性自然海浜工法」(片山ら, 1992)や「ビーチマネージメントシステム」(西村ら, 1997)等がある。ここでは、施工が簡易で、波浪や潮汐条件に関わらず地下水水位を下げた状態を保つことができる「強制浸透(ウェルポイント)による浜漂砂制御工法」に着目した。本技術を用いた現地実験は 1970 年代に Chappell らが、また国内では鹿島灘で柳嶋ら(1992)が実施している。

著者らも遠州灘浜岡海岸において、1995 年から現地実験に着手したが、同年の実験では、運転開始後 1 ヶ月程度でウェルポイントの海浜部設備が破損し、長期間の海浜安定化効果の検討ができなかった。そこで、長期間の運転を可能とするようウェルポイントを改良し、1996 年 11 月～1997 年 9 月の 10 ヶ月間にわたって現地実験を実施した。遠州灘浜岡海岸は、1940 年代以前には前浜の海岸幅も広がったが、近年は海岸幅が狭くなっている地域も多く、今後背後の砂丘を含めた海岸保全が必要と考えられているところである。

2. 改良型ウェルポイントによる海浜安定化の現地実験

本研究における「海浜安定化」とは、海岸保全に必要な海岸幅を確保する、すなわち汀線位置をある位置より後退させないことである。その効果がさらに顕著になると、運転前や周辺の汀線と比較して、汀線が前進した状況で安定し、海浜が造成される可能性がある。

既往の研究成果によると、海浜の地下水水位を低下させた結果、①遡上波の戻り波の一部を吸収し、その中に含まれる砂を海浜に堆積させる効果(遡上域における堆積促進, Chappell ら, 1979)、②海底に下向きの浸透流を誘起し、砂を堆積させる効果(海底部における堆積促進, 河田ら, 1984)、③海浜の地下水の浸出する位置(その位置で浜崖が生じる)を沖側へ移動させることにより、浜崖の後退を防止させる効果(侵食抑制, 柳嶋ら, 1992)、④間隙水圧を低下させることによって、有効応力を増し、砂粒子の移動を妨げる効果(侵食抑制, 福島ら, 1997)などが認められている。堆積促進や侵食抑制の効果は、短期的な海浜安定化効果である。このような短期的な効果が持続するとともに、波、海浜流、風などの営力による堆積砂の移動が抑制された場合に、海浜の安定化が得られる。

本研究では、ウェルポイント工法による海浜安定化を現地海浜で確認することが最終的な目標である。現地実験では、改良型ウェルポイントを長期間運転するとともに、地形、地下水水位、海象、気象などの長期間かつ広域のデータ取得に努めた。

2.1 実施海岸および海象

現地実験を実施した海岸は、遠州灘浜岡海岸の新野川河口から 500 m 東側の浜岡原子力発電所前面である。海浜変形に着目すると、1950 年から 20 年間で 100 m 程度の汀線の後退があり、その後は侵食を受けた状態で安定している。また、実験期間を含めた 3 年間の地形計測より、汀線位置は 3～6 ヶ月の周期で 30 m 程度の範囲で前進後退を繰り返していることが確認されている。海浜地形は、汀線から沖側 200 m 程度まで水深が 1 m 前後という遠浅の海岸であり、バーが存在している。実験をし

* 日本原子力発電(株)土木建築部 土木建設 Gr
** 中部電力(株)浜岡原子力発電所 土木課
*** 正会員 中部電力(株)本店立地総括部 調査 Gr
**** 正会員 佐藤工業(株)中央技術研究所 土木研究部
***** 正会員 工博 筑波大学教授 機能工学系

た海岸では、基礎岩盤が平均潮位-2.5 m程度と浅い位置(砂層が薄い)にあり、海浜の砂の平均粒径は0.5 mm以下の細砂である。

波浪は、有義波高0.5 m~1.0 mの波が45.5%、有義波周期としては5~7秒の出現率が高く、平均有義波高および周期は0.98 m, 6.0秒である。波向きは出現率はSが最も多い。春~秋にはSSE~SSW, 冬にはSSE~WSWの出現率が高くなっている。その結果、実験サイトでは冬季には西から東へ、夏季には東から西への沿岸流が卓越するものと考えられる。また、朔望平均潮差は1.7 m程度である。

2.2 改良型ウェルポイント

図-1に示すように沖側テトラ位置(敷設時の汀線位置)に50 m区間・岸沖方向1列のウェルポイントを敷設した。吸水口の設置位置はM.W.L.-2 m(岩盤高さ)である。また、ウェルポイントの補強と施工性の改良を実施した。図-2に従来型と改良型のウェルポイントを対比させて示した。図-2に示すように、改良型では、内径150 mmの高耐摩耗性ゴムホースを用いた。2.25 mおきに8箇所の吸水口(35 cm)を設け、ヘッダーパイプ・吸水口一体型のウェルポイントとした。また、吸水口の表面はフィルター材で覆った。従来型ではスウィングジョイントとヘッダーパイプの接続部分が弱点となっていたが、改良型ではその部分がなくなって、接続部分の強度の問題点が解決し、長期の運転が可能となった。本工法は強制的に排水するため、設置時の管の勾配を意識する必要がなく、施工は簡単である。ただし、改良型ウェルポイントでは、ヘッダーパイプのレベルで直接吸水するため、滴管状態となり端部へ行く程吸水量が低下する恐れがあった。そこで、端部まで均一に地下水位低下が可能かどうかの検討を行った(歌川ら, 1997)。地上での排水実験、吸水口がある管路の水理計算、および平面2次元の地下水解析を実施し、本実験の設計条件で、端部まで均一に地下水位を低下させ得ることを確認した。

揚水量は約1 m³/min(沿岸方向1 m当たり20 l/min)とした。揚水量の設定では、断面2次元の地下水解析を実施し、海底面近傍の浸透流の下向き流速が、本海岸の砂の水中における落下速度の1/100程度である0.02 cm/s以上になるようにした(河田ら, 1984)。ウェルポイントの運転期間は1996年11月26日~1997年9月17日で、途中故障やメンテナンスで停止したが、217日間にわたって運転を継続し、稼働率73%を達成した。

2.3 計測

海浜安定化効果を確認するため、地形、地下水位、揚水量、海象、気象の計測および観測を実施した。

地形測量はGPSを用い、10日間隔程度で実施した。測量点は、図-1に示すように、ウェル位置周辺(B区域)

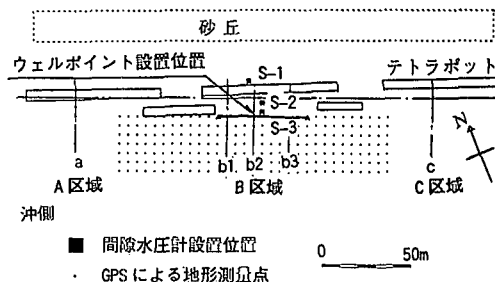


図-1 ウェルポイント敷設位置および測点

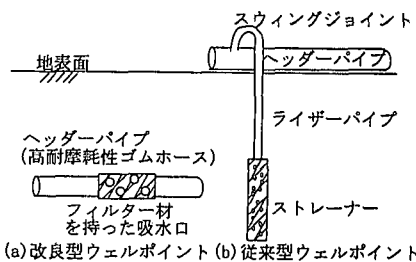


図-2 改良型ウェルポイントと従来型の比較

では5 m間隔メッシュ、またウェル中心から西に200 m(A区域)、東に200 m(C区域)離れた自然海岸で、岸沖方向5 m間隔とした。

地下水位は間隙水圧計(東京測器・KW-3S)を用い、ウェル中心の岸側3点(図-1)において10分間隔で自動計測を実施した。揚水量については、ノッチタンク内に間隙水圧計を設置し、越流水深を測った。

発電所沖合1 kmの地点で波浪計測を行い、気象観測のデータは発電所内で取得した。なお、この観測期間中にビデオ画像を用いた海浜地形観測、浮遊砂、海浜の砂の粒度試験、密度試験、沿岸流の調査、揚水した水の塩分濃度測定も実施したが、これらの結果については別の機会に述べる。

3. 実験結果および考察

本章では、汀線の前進時期が含まれる1996年12月の観測結果を用い、地形変化と波浪、地下水位の関係について考察する。次に、観測結果を整理し、改良型ウェルポイントによる地下水位の低下効果、海浜安定化効果についてとりまとめる。

3.1 地形変化と地下水位、地形の挙動

1996年12/1~12/20に計測された波高、地下水位、揚水量、地形(海浜断面積)の時系列図を図-3、GPSによる地形測量(12/4, 12/12)の結果を図-4に示す。これらの図および他の観測結果から以下のことが分かった。

① 波浪(図-3(a)): 12/5に有義波高6 mの高波浪が来襲しているが、他の期間では2 m以下の波高となっ

ている。なお、期間内の波向きはSSWより西寄りが多い。

② 地下水位(図-3(b))：12/5までは、海浜上のS-2岸側(ウェル位置から7.5m岸側)、S-3ウェル近傍(ウェル位置から2.5m岸側)では、地下水位の挙動は一致している。これは、図-4(a)に示すようにウェル位置の標高が平均潮位以下となっており、いずれの間隙水圧計とも平均水位を計っているためと考えられる。12/5の高波浪時には、海浜部のS-2、S-3ともに砂丘法尻S-1よりも大きな地下水位の上昇とともに振動を生じている。これは、高波浪による平均水位上昇とともに遡上波の影響を受けているためである。この影響により、S-1砂丘法尻の地下水位も一時的に1m程度まで上がっている。12/6以降は、海浜部のS-2、S-3でも地下水位に差異が生じており、S-3ウェル近傍の地下水位が低くなっている。これは、ウェル周辺で、平均潮位より上まで砂が堆積し、運転による地下水位低下の差異が生じているものと推定される。

③ 揚水量(図-3(c))：揚水量は12/6までは、潮汐に関わらず、平均 $1\text{ m}^3/\text{min}$ 以上であったが、12/6以降は、干潮時に揚水量が0に近づいている。これは、12/6以降に砂の堆積により、ウェル位置から汀線が遠ざかり、遡上波から供給される浸透流量が少なくなり、干潮時に運転によりウェル近傍での地下水位が -2 m (吸水口位置)まで低下したためである。

④ 地形(図-3(d)、図-4)：11/22に実施したウェルポイント敷設工事で砂層を乱したため、12/4の計測では敷設位置が侵食を受け、汀線が後退した状態となっている(図-4(a))。しかし、それ以降ウェル位置で堆積が生じ、12/12にはB区域を中心に汀線はウェル位置から20m沖に前進している(図-4(b))。このような堆積が生じた時期は、上述したように地下水位および揚水量の時系列に変化が生じた、高波浪来襲(12/5)直後の平穏時(12/6~12/7)と推定される。このように、高波浪来襲後の短期間に堆積が生じていることが、地下水位および揚水量の記録から確認された。

3.2 地下水位低下効果

ウェル運転時期と停止時期に分けて、ウェル位置の標高と地下水位(S-3)の関係を図-5、波高と地下水位の関係を図-6に示す。潮汐の影響を取り除くため、地下水位および波高データについては日平均値を用いた。これらの結果より、

① 図-5に示すように、ウェル位置の標高が平均水位より高い場合に、運転により地下水位が低下する。地下水位の低下は堆積量に比例する。これはウェル位置の地盤高さが高くなり、遡上波から供給されるウェルへの浸透流量が少なくなったためと考えられる。

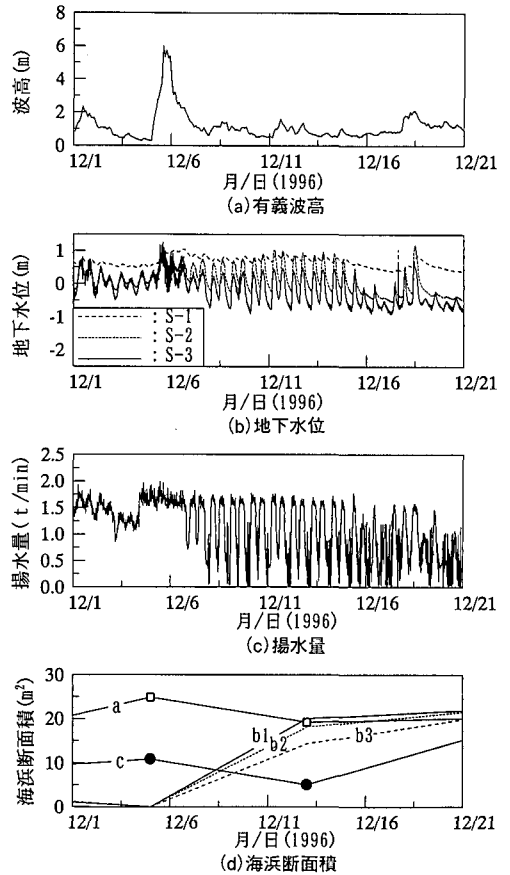


図-3 1996年12月の計測結果(12/1~12/20)

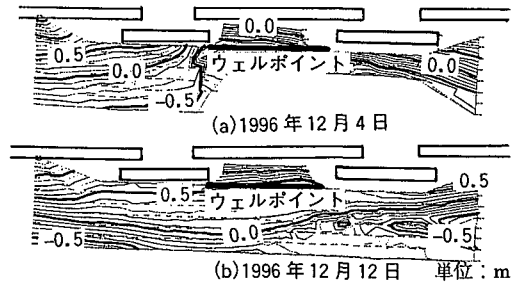


図-4 GPSによる海岸地形測量

② 図-6に示すように、ウェルポイント運転による地下水位低下効果(停止時に比較した地下水位低下量)は、本海岸の平均波高1mでは0.8mである。高波浪時には、地下水位低下効果は小さくなる。これは平均水位上昇や遡上波の影響であろう。

3.3 海浜安定化効果

改良型ウェルポイントによる海浜安定化効果を検討するため、標高や汀線の前進量の絶対量、および時間変化量に着目して、自然海岸との比較を試みた。

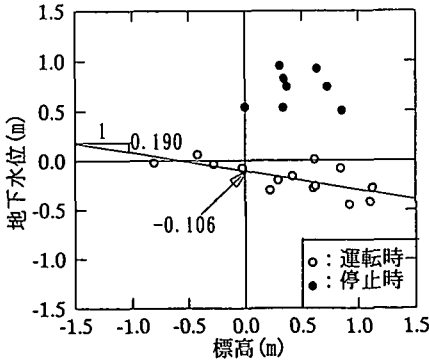


図-5 標高と地下水水位の関係

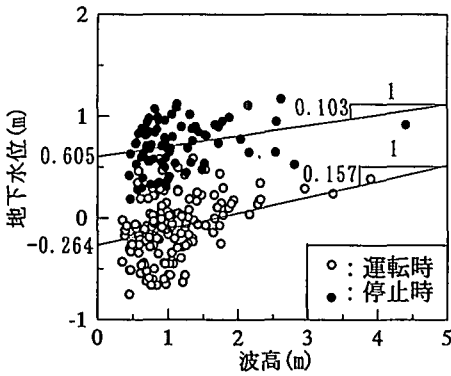


図-6 波高と地下水水位の関係

(1) 海浜安定化

ウェルポイントの運転による海浜安定化効果を検討するため、ウェル実施海岸 (B 区域) と自然海岸 (A, C 区域) の、汀線位置、ウェル背後 (岸側テトラ前面) の標高の経時変化を比較し、図-7 に示す。

図-7(a) に示すように、汀線位置は運転期間中に岸側テトラ位置 (0 m 位置) より後退しなかったこと、およびほぼ連続に運転された 1997 年 3 月までは 20 m 程度沖側にあったことから、海浜安定化の目標は達成されたものと判断される。ただし、汀線位置が自然海岸より沖側となったのは、12 月と 2 月初めの短期間であり、汀線が自然海岸より前進し、安定する状況は確認できなかった。また、ウェル背後の標高 (図-7(b)) に着目すると、汀線が自然海岸よりも前進した直後の 96 年 12 月~97 年 1 月中旬、97 年 2 月中旬から 3 月初旬に、堆積量が大きい時期が認められる。これは、ウェルポイントの運転により、汀線が急速に前進した結果、海浜上に堆積した砂がウェル背後のテトラ前面周辺に移動したものと考えられる。

(2) 堆積促進効果

堆積促進効果を調べるため、汀線位置、波高 (日平均

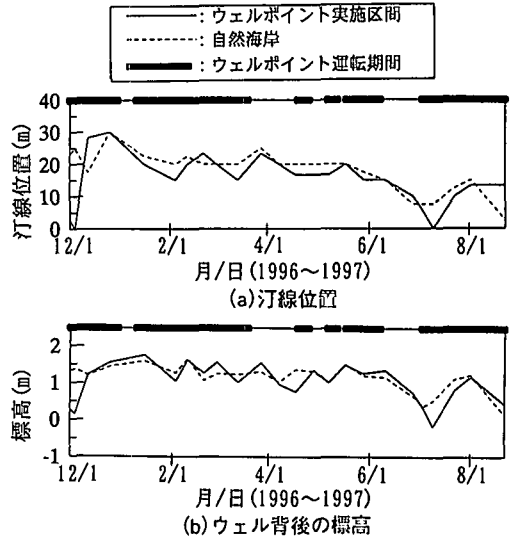


図-7 汀線位置および標高の長期変動

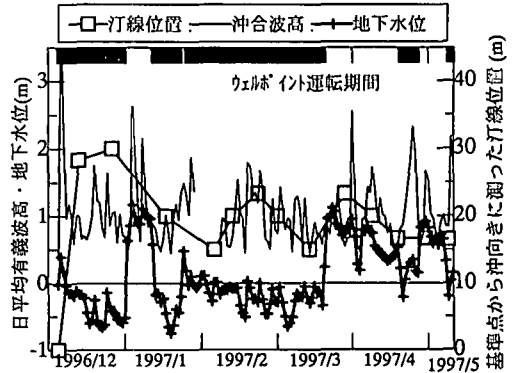


図-8 汀線位置・地下水水位・波高の経時変化

値)、地下水水位 (日平均値) の経日変化を図-8 に示す。図-8 より以下のことが分かる。

① ウェルポイント運転時に汀線の前進が見られたのは 1996 年 12 月初旬と 1997 年 2 月初旬である。その際、堆積当初、地下水水位は平均潮位と同程度であるが、汀線の前進にしたがい、水位低下量は増大している。ただし、堆積が進みウェル位置と汀線の距離が大きくなると、地下水水位は低下するものの汀線は前進しなくなる。

② 3.2 節で示したように、地下水水位と波浪状況は相関があり、停止時はその関係が顕著である。

堆積促進が認められる、12/4-12/12 および 2/3-2/10 のウェル直上の沿岸方向の標高変化量を図-9 に示す。この結果から、ウェル区間を中心に標高の増加量が大きい。これはウェルポイントによる堆積促進効果であると言える。標高変化量分布から、堆積量が東側に偏って

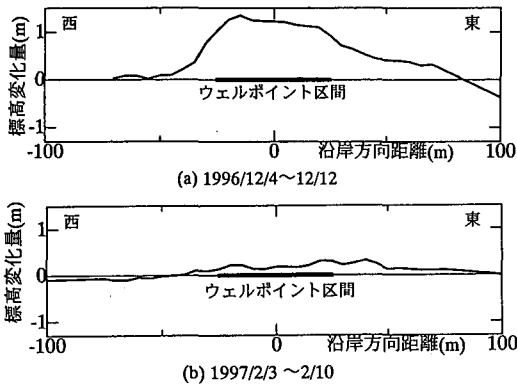


図-9 沿岸方向の堆積量

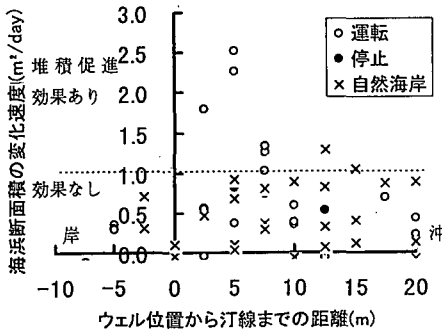


図-10 汀線位置と海浜断面面積の変化量の関係

いる。これは冬季の季節風および沿岸流の影響と考えられる。

汀線がある程度前進するとウェルポイントによる堆積促進効果が小さくなる状況を詳細に調べるため、ウェル位置から汀線までの距離と海浜断面面積の変化速度の関係を図-10に示す。図中、○印は運転時期、●印は停止時期、×印は自然海岸のデータである。自然海岸および停止時期のデータから、汀線がテトラ位置から岸沖方向30mの範囲、すなわち通常の汀線移動の場合、海浜断面面積の変化速度は $1.0 \text{ m}^2/\text{day}$ 以内であることが分かる。したがって、変化速度が $1.0 \text{ m}^2/\text{day}$ を越えた場合に堆積促進効果があったものと考え、図-10から以下のこと分かる。

① 汀線位置がウェル位置から2.5~7.5m沖側にある場合に、最大で通常の2.5倍程度の堆積促進効果が認められた。これは平面2次元の地下水解析で得られた地下水位低下領域とも一致する。またこの堆積促進効果は遡上域における堆積促進効果に対応するものである。

② 汀線位置がウェル位置から10m以上沖側に離れた場合には堆積促進効果は見られない。これは遡上域が

地下水位低下領域よりも沖側となり、遡上域における堆積促進効果が小さくなるためである。

③ 汀線位置がウェル位置より岸側となり、ウェル位置が没水した場合は堆積効果は見られない。これは砂が海浜流や波によって移動するためである。

4. 結 論

改良型ウェルポイントの遠州灘浜岡海岸における現地実験の結果をとりまとめると、以下の通りである。

1) ヘッダーパイプ・吸水口一体型の改良型ウェルポイントの開発により、海岸での長期間運転が可能となり、波浪条件、潮汐条件、堆積状況で変化するもののウェル位置で日平均1m程度の地下水位低下効果が認められた。

2) 浜岡海岸における沿岸方向に1列50mのウェルポイントの実験では、短期間の堆積促進効果は見られたものの、汀線の前進に至るまでの効果は得られなかった。これは本海岸の波浪、流れ、風といった営力により、堆積した砂が実施箇所からもち去られること、およびウェルポイントによる堆積促進効果は、汀線とウェルの距離が10m以内にある場合に限定されるためと考えられる。

今後、海岸幅を現状よりも広く維持するためには、多列のウェルポイントを設置すること、また沿岸方向の漂砂営力が大きい海岸では、堆積した砂をそこに止める技術の検討も必要である。最後に本研究を進めるに当たり、現地観測において協力をいただいた筑波大学の福島雅紀博士(現建設省土木研究所)、木村孝次氏に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 歌川紀之・丹羽孝道・西村仁嗣(1997): 新型ウェルポイントにおける吸水能力に関する検討, 土木学会年次学術講演会, 第52回, II-302.
- 片山 忠・黒川 誠・柳嶋慎一・加藤一正・長谷川巖(1992): 透水層設置による前浜地下水位の制御, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 871-875.
- 河田恵昭・Larsen, L. H. (1984): 漂砂の移動限界に及ぼす吸水の効果, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 267-271.
- 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. 646-650.
- 福島雅紀・西村仁嗣・木村孝次(1997): 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.
- 柳嶋慎一・加藤一正・片山 忠・磯上知良・村上裕幸(1991): 地下水位低下の前浜地形変化におよぼす影響, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 266-270.
- Chappell, J., I. G. Eliot, M. P. Bradshaw and E. Lonsdale (1979): Experimental control of beach face dynamics by water-table pumping, Eng. Geol., 14, pp. 29-41.