

日, 米, 欧の海岸保全の相互評価 (1)

——侵食要因と対策——

山下隆男*・土屋義人**・D. R. Basco***・M. Larson***

1. 緒 言

海岸侵食制御, 海岸保全の動向は, 世界的にみて, ハードな構造物からソフトな砂浜海岸の造成へと移行している。これは砂浜海浜の持つ消波機能や環境維持機能の重要性, 柔軟性, 自然との調和および経済性が見直されたことと, 海浜変形予測がかなりの確度で可能になったことによる。養浜による砂浜の造成, 維持のための技術開発, 自然環境への影響評価, 経済効果, 砂浜の管理等を総合的に検討する研究分野 (Beach Engineering) が盛んになってきている。

世界で最初の大規模な養浜は 1922 年に米ニューヨーク市が行った Coney Public Beach Project である。1956 年に米国国会が養浜を構造物に準ずる工法として認め, その後米国では養浜が海岸侵食制御の主流となった。一方, 欧州では 1950 年台からオランダとドイツが養浜を海岸侵食制御工法として取り入れ, その後欧州連合の各国に普及し, 自然外力や利用目的に応じて構造物と養浜を取り混ぜたバリエーションのあるソフトビーチが建設されている。しかしながら, わが国では, 漁業権が足枷となっているため養浜砂の確保が難しく, 養浜砂の単価が高いため, 養浜そのものが構造物に準ずる工法として認められておらず, 構造物主体の海岸保全が行われてきた。このため, わが国の砂浜海岸は減少の一途をたどり消波ブロックや離岸堤で覆われた「美しくない海岸」を造り続けてきたようだ。

それでも、(それだからこそ?), 近年わが国では, 海岸の開発や保全に, 「海岸環境創造」という言葉が頻繁に用いられるようになってきた。海岸の環境を「創造」という意味なのであろうが, 何となくしっくり来ない用語である。恐らく, 構造物に頼り過ぎたことへの反省や反発の意味を込めた用語なのであろうが, 想像する術を知らない人間にとっては面映ゆい響がある。それでも敢えてこの言葉をつかわせていただくことにして, 今,

世界がどのように海岸の環境を創造しようとしているのかを, 海岸侵食制御, 海岸保全の立場から調査してみようとする試みが, 本研究の目的である。そこで, まず砂浜海岸を取り上げ, これを保全するための思想, 姿勢, 対策を地球規模で調査する。

本研究では, 養浜と構造物をテーマとして侵食要因と保全方法に焦点を絞った調査を行い, 日米欧の海岸保全の相互評価を行い, 海岸保全の在り方を考える。

2. 日米欧の海岸侵食の要因と対策

土屋ら (1991) が指摘しているように, 海浜侵食の要因としては, 構造物により沿岸漂砂が直接阻止されることに起因する侵食, 漂砂源の減少によって起こる侵食 (第 1 要因), と構造物の築造や海底地形の変化によって波浪場や海浜流場が変化することにより生ずる変動 (第 2 要因) とに分けて考えることができよう。第 1 要因は直接的であり, 多くの場合主要因で, 広範囲に影響を及ぼす。また, 第 2 要因は 2 次的要因であり, その影響範囲は限定されるが, 予測ができなかったり, 忘れられがちな要因で, 地域性, 特殊性がある。何れにしても, 海岸構造物周辺の海浜変形 (侵食) はこれら 2 つの要因の重ね合わせとして発生する。

(1) 米国の場合

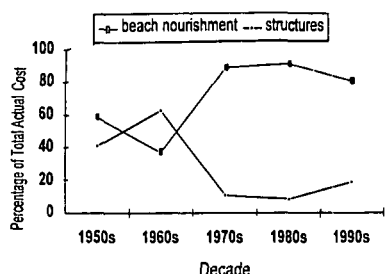
太平洋側 (西海岸) とバリアアイランドと呼ばれる沿岸州の発達した大西洋側 (東海岸) とでは地質学的に海浜の形成過程は異なり, 侵食要因も相違している。東海岸では, 豊かな沿岸漂砂により形成された沿岸州の侵食が問題である。沿岸州の切れ目 (inlets) で補足される沿岸漂砂量の変化が自然パイプスの均衡をこわす場合に大きな侵食が生じる。これらの不均衡は航路 (jetty, channel) の維持や新たな掘削が誘因となり発生する。その他の第 1 要因としては, 河川からの流送土砂の減少, 地盤沈下がある。また, 東海岸ではハリケーン来襲時に発生する高潮や異常波浪により沖方向へ運ばれた砂が戻ってこない (異常波浪による砂の流失) 場合が大きな侵食要因として考えられる。沿岸漂砂系 (sedimentation cell) のスケールが大きいこともあって, 米国の場合, これらの海岸侵食に対して, 早くから養浜を主体として対応して

* 正会員 工博 京都大学助教授 防災研究所

** 正会員 工博 名城大学教授 都市情報学部

*** Ph.D. オールドドミニオン大学教授 工学部

**** Ph.D. ルンド大学助教授 工学部



図一 米国の構造物と養浜に使われた費用（連邦政府の予算）の比率の経年変化

きた。図一に米国の構造物と養浜に使われた費用（連邦政府の予算）の比率の経年変化を示したが、これからわかるように、1970年代以降は圧倒的に養浜事業が主流をしめている。州や市の予算についても同様の傾向があることが予想されるが、今後の調査が必要である。

(2) 欧州の場合

CUR (1987) によると、海岸侵食は欧州全域でも深刻な問題となっており、洪水や侵食から国土を護るための海岸保全対策や研究が数多く行われている。海岸侵食の主要因は、海岸構造物による沿岸漂砂の阻止、漂砂源の減少、異常波浪による浜崖の侵食、海岸砂採取、地盤沈下のような第1要因の他に、大規模なサンドウエーブ (sand wave) の移動による波浪場、海浜流場の変化が季節的な海岸変動を起こす (フランス) 第2要因がある。

これらの侵食対策に対して、外洋に面した海岸、地中海沿岸、北海沿岸の地域差により、潮汐の有無、ストームの強さおよび底質特性の相違等の多様性はあるが、養浜あるいは構造物+養浜によるソフトビーチの建設が主な対策方法である。養浜による利点が一般的に受け入れられるようになり、米国同様、養浜への移行傾向は益々顕著になってきている。

(3) 日本の場合

わが国の海岸侵食の最も大きな要因は、河川改修、ダム建設、洪水制御のために生じた河川からの流送土砂の減少にある。特に、新潟海岸、下新川海岸のように河口デルタの縮小の影響を直接受ける地域では、顕著で不可避な海岸侵食が発生する。さらに、わが国の典型的な海岸侵食の要因には、大規模な海岸構造物の築造による周辺海岸の漂砂の不均衡が挙げられる。その他にも、地盤沈下や侵食を防止するために建造した海岸構造物による沖方向漂砂の助長等の副次的な要因があるが、海岸侵食制御に対してはハードな対応が主流である。これは、わが国では養浜が適切な工法ではないわけではなく、養浜に対する経験不足、経済性の問題、漁場とボローサイトの問題等多くの要因がある。しかしながら、海岸環境創造を主張する以上、養浜の導入無しでは事業が遂行でき

なくなっていることも事実である。わが国においても、海岸保全がハードからソフトへ移行してきており、離岸堤、人工リーフ、緩傾斜護岸に代わり、サンドパイパス、安定海浜工法、養浜による人工海浜造成等が受け入れられるようになってきている。

3. 養浜工の概要

養浜は主として、海岸侵食を防止したり、底平地を洪水から護ったり、レクリエーション的な砂浜を造成したりするために用いられる。そのため、一概に養浜と言っても、目的に応じて施工方法が異なる。養浜砂の投入方法についてみても、図二に示すように、大きく分けて3通りの方法がある。すなわち、(a) バームのような浜の高い位置に養浜する方法、(b) 前浜に均一に置く方法、および (c) 碎波帯に人工のマウントやバーとして置く方法、がある。昔から、(a) の方法が最も一般的であったが、最近では、碎波帯のやや深い場所に砂を置く方法が試みられている。

養浜の工程には、まずボローサイトの決定、養浜砂の輸送、設置があるが、これらをどのように結合するかは養浜場所によって大きく異なる。さらに、養浜砂の量、養浜形状、砂質および維持養浜の方法、構造物との併用等多くの検討課題がある。これらの問題に関しては、1980年代以降、海浜断面形状や汀線変化予測のための数値モデルの助けを借りて養浜工の設計が行われてきた (SPM; 1984, CUR; 1987)。前者は単一ストームに対する岸沖方向の漂砂による変形を検討し、後者は長期に渡る沿岸方向漂砂による変形を検討する。

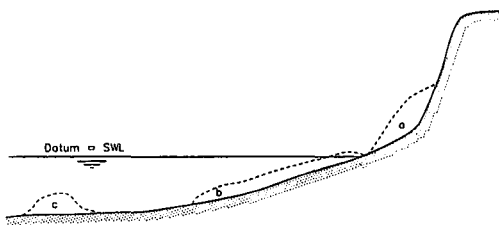
また、養浜前、中および後のモニタリングが重要であることは常に指摘されるところであるが、欧米においても、研究上興味のある養浜プロジェクト以外にはモニタリングは積極的に行われていないのが現状である。

4. 欧州および米国の養浜事業

ここでは、豊富な養浜の歴史をもつ欧州と米国について、養浜プロジェクトの概要を調査した結果を示す。

(1) 米国の場合

アメリカ本土の海岸線の総延長は 59,700 km でその

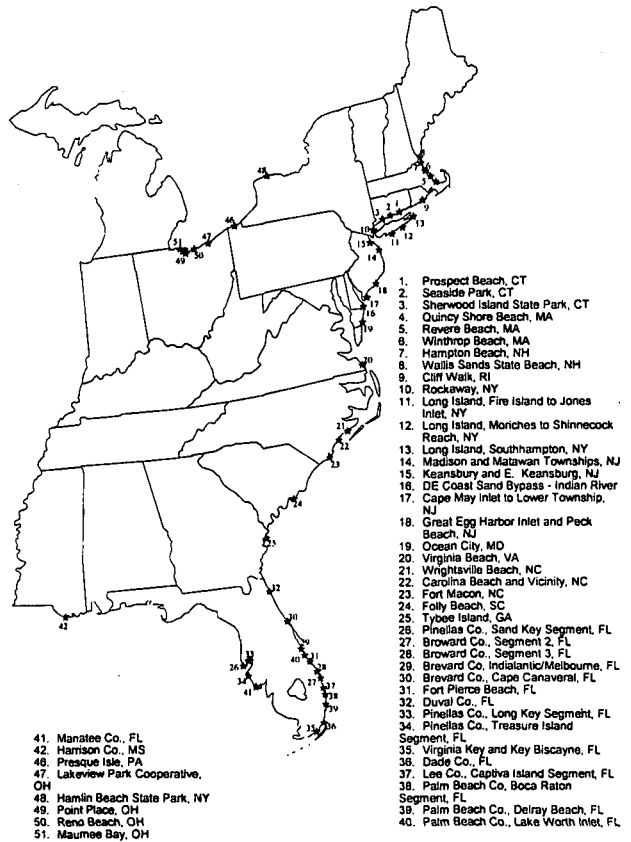


図二 養浜砂の投入方法 (Graaff et al., 1991)

うち 4,200 km が厳しい侵食を受けている。これらの侵食海岸を保全するために、連邦政府は 1950 年から 1993 年までに 56 の直轄の (工兵隊による) 海岸保全プロジェクトを実施した。米国水資源研究所 (IWR, 1996) の報告書によれば、全プロジェクトの工費は 1993 年の米ドル換算 (百万ドル) で表一1 のようである。海岸構造物への依存度が極めて少ないこと、養浜に 80% 以上が費やされている。

また図-3 には、ミシシッピ川以東の連邦政府による海岸保全プロジェクトの位置を示している。また、養浜の場合、砂浜海岸の管理費用を、国、州、市がどのような負担で、分担で行うかを決定することが事業の重要な部分である。

以下に、米国において最も成功した養浜による海岸保全事業として、マイアミ海岸の例を示しておく (Wiegel, 1992)。このプロジェクトは経済効果が大きな海岸保全事業として有名であり、1985 年に年最優秀プロジェクトとして表彰されている。マイアミ海岸は 1970 年半ばまでは砂浜の無い海岸であったが、1970 年後半に養浜が実施されてからは海浜の年間利用者数は 800 万人 (1978 年) から 2100 万人 (1983 年) に増えた。この結果、この海岸の年間総収入は 15 年間に渡る初期養浜事業の費用の約 40 倍になっている。さらに、この事業は、維持養浜砂量が当初計画していた量より少なく済んだこと (1980 年から 45 万 m^3)、1992 年のハリケーン ANDREW に対しても顕著な侵食が無かったこと等、養浜の効果を再確認できる結果を出している。この事業は、1977 年に北端の Bakers Haulover Inlet から開始され、1981 年に南端の Governmant Cut までの総延長 16 km の養浜が行われた。養浜砂は 1.8~3.5 km 沖の汀線に平行な領域の海底砂で、浮パイプラインにより浚渫土砂を前浜に輸送し、平均海面上 (MWL) 3 m、幅 55 m の砂浜と MWL 上 3.5 m、幅 6 m の砂丘を造成した。初期養浜砂量は約 1,100 万 m^3 で、工費は 3,758 万ドル (1993 年換算) であった。写真-1 に養浜の前後のマイアミビーチを示すが、これからも大規模で効果的な養浜



41. Manatee Co., FL
42. Harrison Co., MS
43. Presque Isle, PA
47. Lakeview Park Cooperative, OH
48. Hamlin Beach State Park, NY
49. Point Place, OH
50. Reno Beach, OH
51. Maumee Bay, OH

1. Prospect Beach, CT
2. Seaside Park, CT
3. Sherwood Island State Park, CT
4. Quincy Shore Beach, MA
5. Revere Beach, MA
6. Winthrop Beach, MA
7. Hampton Beach, NH
8. Wallis Sands State Beach, NH
9. Cliff Walk, NJ
10. Rockaway, NY
11. Long Island, Fire Island to Jones Inlet, NY
12. Long Island, Moriches to Shinnecock Beach, NY
13. Long Island, Southampton, NY
14. Madison and Matawan Townships, NJ
15. Kearsburg and E. Kearsburg, NJ
16. DE Coastal Sand Bypass - Indian River
17. Cape May Inlet to Lower Township, NJ
18. Great Egg Harbor Inlet and Peck Beach, NJ
19. Ocean City, MD
20. Virginia Beach, VA
21. Wrightsville Beach, NC
22. Carolina Beach and Vicinity, NC
23. Fort Macon, NC
24. Folly Beach, SC
25. Tybee Island, GA
26. Pinellas Co., Sand Key Segment, FL
27. Broward Co., Segment 2, FL
28. Broward Co., Segment 3, FL
29. Brevard Co., Indian River/Melbourne, FL
30. Broward Co., Cape Canaveral, FL
31. Fort Pierce Beach, FL
32. Duval Co., FL
33. Pinellas Co., Long Key Segment, FL
34. Pinellas Co., Treasure Island Segment, FL
35. Virginia Key and Key Biscayne, FL
36. Dade Co., FL
37. Lee Co., Captiva Island Segment, FL
38. Palm Beach Co., Boca Raton Segment, FL
39. Palm Beach Co., Delray Beach, FL
40. Palm Beach Co., Lake Worth Inlet, FL

図-3 ミシシッピ川以東の連邦政府による海岸保全プロジェクト

事業であったことが確認できる。

(2) 欧州の場合

図-4 に欧州で養浜事業の行われている箇所を太い線で示す (SAFE, 1995)。国別に侵食要因、対策について整理すると以下のようなものである。

1) ドイツ：1951/52 年に Norderney 島で最初の養浜が捨て石と養浜 (300 万 m^3) の併用で行われた (Kramer, 1972, Kunz, 1990)。1972 年から Sylt 島で砂丘と護岸を護るための養浜やその他何種類かの侵食対策工法が実施された (Dette, 1977)。1985 年には、図-5 のように浜崖の前面に 250~450 m^3/m の海底養浜が汀線に平行方向に行われた。全養浜砂量は 200 万 m^3 である。図には海浜断面形状の時間的な変化が示されており、これから 1985 年~1990 年の間に来襲した高潮により顕著な海岸決壊が生じ、沖方向に養浜砂が流失していることがわかる (Newe, 1997)。

2) オランダ：1950 年代から、海岸侵食制御に養浜が適用されてきており、今日では最も一般的な「工法」として定着している。養浜の主目的は洪水対策、砂丘の保全、砂浜の消失防止、リゾート地の確保および浚渫土砂

表一1 アメリカ本土における養浜プロジェクトの工費の割合

Type of Measure	Federal Costs	Total Costs
Initial restoration	180.7	303.3
Periodic Nourishment	147.2	235.4
Structures	59.4	115.6
Emergency Measures	15.9	15.9
Total	403.2	607.2

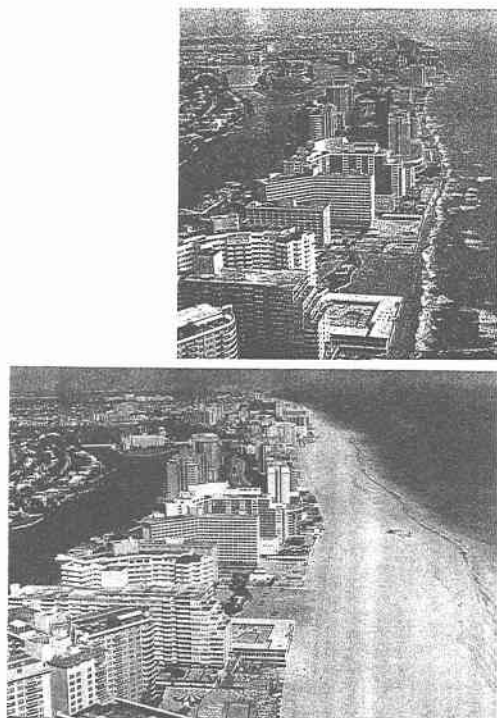


写真-1 養浜の前後のマイアミビーチの様子

の処理である。1952年から1989年までに50のプロジェクトが実施され、養浜砂量は $6,000 \text{ m}^3$ に達している (Roelse, 1990)。養浜以前には突堤工法が主流であったため、養浜砂は既存の突堤間に入れられた。養浜事業の大半は北部の East Frisian Islands か南の Delta Coast で行われている。これまでは後浜への養浜が行われてきたが、最近では MAST Program の援助で前浜への養浜も行われている (NOURTEC)。



図-4 欧州の養浜事業の実施箇所

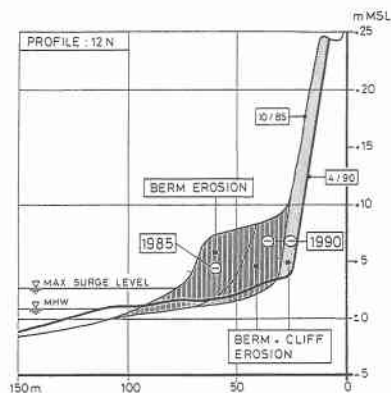


図-5 Norderney 島での養浜後の海浜断面形状の時間的変化 (Newe, 1997)。

3) フランス、イタリア：養浜は突堤や離岸堤との併用で行われている (SAFE, 1995)。フランスは潮位差の大きい大西洋側の海岸と潮位の小さい地中海沿岸の海岸を持っているが、何れも養浜を主体とした保全が行われている。前者では大規模な sand wave の移動による海浜の季節的な変動を制御するために養浜が行われ、後者ではリゾート海岸を保全するために養浜が行われている。イタリアでも海岸侵食が問題となっており、ここでの多くの養浜は観光資源の確保のために行われている。典型的な例として、ローマ近郊の Lido of Ostia では、3 km に渡り 50 m^3 の養浜が実施されている (Ferrante et al, 1992)。また、ベニスラグーンにおいても幾つかの養浜事業が実施されている。

4) スペイン：大西洋、地中海に面したスペインの海岸では養浜事業が積極的に行われているが、多くの場合リゾート海岸の確保、開発が目的である (SAFE, 1995)。写真-2 に Malagueta の養浜事業の例を示す。この海岸では 170 m^3 の砂が 2.5 km に渡り入れられており、2基の突堤によって養浜砂が沿岸方向に安定な状態で維持されている (MOPU, 1991)。また、スペインでは幾つかの養浜海岸において詳しいモニタリングが実施されている (Villaverde 1994, Toba et al, 1994)。

5) イギリス、デンマーク：海岸侵食制御のために養浜が活発に行われている。イギリスでは、砂利浜 (shingle beach) れき浜の消失を制御するための shingle 養浜が行われている (Davison et al, 1992, Maddrell et al, 1994)。デンマークでは、NOURTEC の一環として西海岸の養浜が実施されている (Hesselink, 1996)。

5. 結 語

以上、養浜と構造物をテーマとして海岸侵食の要因と養浜を援用した海岸保全に焦点を絞り、米国、欧州の海

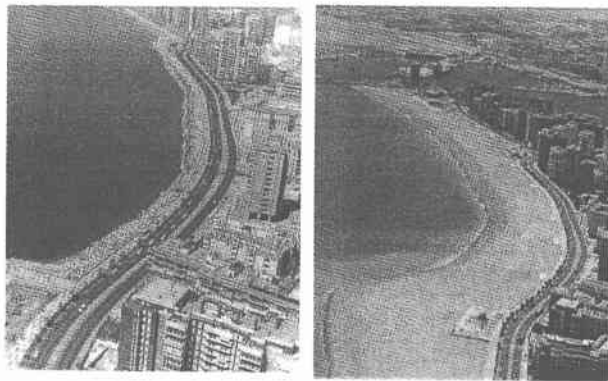


写真-2 Malagueta (スペイン) の養浜事業の例

岸保全の方向とわが国のそれとを対比させながら, 相互評価のための資料を作製した。

今後, 海浜工学 (Beach Engineering) における養浜の位置付けと以下のような技術的課題に着目して, 海岸保全の在り方と, これから解決すべき課題と方法を模索して行きたい。(1) 構造物と併用する場合の養浜工の設計, (2) 養浜砂の流失制御方法, (3) 養浜砂の移動予測シミュレーションモデル。

なお, 本研究は文部省科学研究費, 国際学術研究 (学術調査) (研究代表者: 山下隆男, 09041125) による研究成果の一部である。

参 考 文 献

- CUR (1987): Manual on Artificial Beach Nourishment, Centre for Civil Engineering Research, Codes, and Specifications, Rijkswaterstaat and Delft Hydraulics, Report 130, The Netherlands.
- Davison, A. T., Nicholls, R. J., and Leatherman, S. P. (1992): Beach Nourishment as a Coastal Management Tool: An Annotated Bibliography on Developments Associated with the Artificial Nourishment of Beaches, Journal of Coastal Research, Vol. 8, No. 4, pp. 984-999.
- Dette, H. (1977): Effectiveness of Beach Deposit Nourishment, Proceedings of Coastal Sediments '77, American Society of Civil Engineers, pp. 211-227.
- Ferrante, A., Franco, L., and Boer, S. (1992): Modelling and Monitoring of a Perched Beach at Lido di Ostia (Rome), Proc. 23rd Int. Conf. on Coastal Eng., ASCE, pp. 3305-3318.
- Graaff, J., Niemeyer, H. D., and Overeem, J. (1991): Beach

- Nourishment, Philosophy and Coastal Protection Policy, Coastal Engineering, Vol. 16, No. 1, pp. 3-22.
- Hesselink, A. W. (1996): Sediment Response in a Littoral System at Torsminde Tange, Denmark (Affected by a Combined Shoreface and Beach Nourishment), Institute of Marine Science and Atmospheric Research Utrecht, Utrecht University, Report 96.01 O, Utrecht, The Netherlands.
- IWR (1996): An Analysis of the U.S. Army Corps of Engineers Shore Protection Program, Institute of Water Resources, IWR Report 96-PS-I, U.S. Army, Fort Belvoir, VA.
- Kramer, J. (1972): Artificial Beach Nourishment on the German North Sea Coast, Proc. 13th Int. Conf. on Coastal Eng., ASCE, pp. 1465-1483.
- Kunz, H. (1990): Artificial Beach Nourishment on Norderney, a Case Study, Proc. 22nd Int. Conf. on Coastal Eng., ASCE, pp. 3254-3267.
- Maddrell, R., Osmond, B., and Li, B. (1994): Review of Some 30 Years Beach Replenishment Experience at Dungeness Nuclear Power Station, UK, Proc. of the 24th Coastal Engineering Conference, ASCE, pp. 3548-3563.
- MOPU (1991): Costas, Ministerio de Obras Publicas y Transportes, Direction General de Puertos y Costas, Malaga, Spain.
- Newe, J. (1997): Documentation of Berm Beach Nourishment (Wennigstedt/Uampen on Sylt in 1985), Interim Report, SAFE-MAST Project, Technical University of Braunschweig, Braunschweig, Germany.
- Roelse, P. (1990): Beach and Dune Nourishment in The Netherlands, Proc. 22nd Int. Conf. on Coastal Eng., ASCE, pp. 1984-1997.
- SAFE (1995): Performance of Soft Beach Systems and Nourishment Measures for European Coasts, Proposal No. PL 950057, Marine Science and Technology (MAST-III), European Commission: Science Research, and Development.
- SPM (1984): Shore Protection Manual, Coastal Engineering Research Center, USAEWES, Vicksburg, MS.
- Toba, E. Gomez-Pina, G., and Alvarez, J. (1994): Santa Cristina Beach Nourishment Works and Monitoring Program, Proc. 24th Int. Conf. on Coastal Eng., ASCE, pp. 3579-3593.
- Tsuchiya, Y., T. Yamashita and R. Silvester (1990): Beach Erosion Due to Large Coastal Structure and Its Control, Proc. 22nd Int. Conf. on Coastal Eng., ASCE, pp. 2726-2739.
- Villaverde, J. M. M. (1994): Gros Beach Nourishment (San Sebastian, Spain), Proceedings of Hydro-Port '94, Yokosuka, Japan, pp. 1131-1140.
- Wiegel, Robert. (1992): Dade County, Florida, Beach Nourishment and Hurricane Surge Protection, Shore and Beach, Vol. 60, No. 4, October.