

フロリダ州の養浜事業に関する研究

小島 治幸*・Thomas J. Campbell**・Kim Beachler***
Rick Spadoni***・Robert G. Dean****

1. はじめに

海岸侵食は、沿岸域が抱える主要な問題の一つである。田中ら (1993) は、地形図の比較より最近 15 年間における侵食による全国の消失海岸面積が 2,395 ha に達し、侵食速度は明治から昭和におけるその 2 倍以上と、侵食が激しくなっていることを報告している。現在のところ海岸侵食の対策法としては、人間活動の撤退と構造物による海岸の固定、養浜の 3 つしかない。わが国では、このうち 2 番目の対策法が主に取られており、自然の砂浜海岸が消滅する重要な要因のひとつとなっている。海岸の環境整備を目的とした養浜工は施工されているが、侵食対策としての大規模な養浜はいまのところ例がないと思われる。これに対して、米国を初めとしてオランダ、ドイツなどでは、侵食対策とリクレーションのための海浜整備をかねた大規模な養浜工が積極的に行われている。養浜工の利点は、(1) 特定の地域における近自然海岸を維持保全することができる、(2) 近隣の海岸に対しての影響を和らげる、(3) 陸上の財産に対するある程度の保護を提供する、(4) 費用を長期間に振り分けることができる、(5) 最小の努力により自然の海岸状況を反転する可能性がある、等があげられる (Wang, 1989)。

本研究の目的は、養浜工事業の歴史を調べることと、米国の中でも積極的に養浜事業を展開しているフロリダ州における養浜事業を調査し、それを実施するときのプロセスと工学的な設計手順を明らかにすることである。また、ケーススタディとして、1973 年より始まり 3 度の再養浜がなされるとともに 20 年間に及ぶ事後調査がなされている大西洋に面した Delray 海岸を選び、20 年間のモニタリング調査の結果より侵食対策としての養浜工の効果を考察する。

2. 養浜工の歴史

養浜工の歴史について文献調査を行った。記録に残る最初の養浜事業は、1922 年にニューヨーク州の Coney

Island の 1.1 km の海岸で行われ、ニューヨーク港からの約 $1.3 \times 10^6 \text{ m}^3$ の浚渫土砂が養浜砂として用いられた (Hall, 1952)。1922 年から 1950 年までに主に南カリフォルニアの海岸とニューヨーク、ニュージャージー州の海岸で 72 件の養浜事業が施工されたが、基本的な設計基準はなく、事後調査も行われなかった。それ以降の 30 年間では、大西洋側の東海岸で 90 もの養浜事業が行われた (Toyna & Pilkey, 1988)。そのうちの 1/3 にあたる 31 の事業がフロリダ州で行われた。フロリダ州では 1965 年から 1984 年の間に 107.7 km の海岸が養浜され、事業費 1.16 億ドルが使われた (Florida DNR, 1984)。このうち、0.93 億ドルが 82 km の海岸の養浜 (1.13 千ドル/m) に使われ、0.23 億ドルが 26 km の海岸の再養浜 (0.88 千ドル/m) に使われた。規模的には、マイアミ海岸の養浜事業が最も大きい。約 0.50 億ドルをかけて $11 \times 10^6 \text{ m}^3$ の土砂 (4.55 千ドル/m^3) が 16 km の海岸におかれた (3.12 千ドル/m)。他国での養浜事業としてはオランダとドイツが活発に事業を展開している。そのなかでもオランダは、1953 年にはじめて Schevenigen において $70 \times 10^3 \text{ m}^3$ の養浜が行われた。1952 年から 1985 年にかけて 32 の養浜事業が完成している (Pilarczyk ら, 1987)。養浜事業の費用は、米国のそれと比べて半分程度で済むようである。

養浜工の技術的進展としては、1957 年頃から必要とする養浜砂の土量を算定する方法として overfill ratio の概念が提案された (Krumbein & James, 1965; James, 1974; Dean, 1974)。次に、1970 年後半に平衡海浜断面の概念が取り入れられ、養浜海浜の形状の決定に用いられている。またそれ以降、各種の数値モデルが開発され、養浜工の設計に用いられている (Dean, 1983)。オランダでは、多くの養浜事業から得られた技術をまとめマニュアルを作成している (Pilarczyk ら, 1987)。

3. フロリダ州における養浜事業

3.1 海岸の状況と自然条件

フロリダ州の海岸は、大陸の沖にそれとほぼ平行に発達した barrier island 上に位置し、自然および人工のインレット (感潮狭口) により切断されたほぼ直線状の海岸である (図-1)。標高の最高地点が海面上 80 m 程度と

* 正会員 工博 九州共立大学教授 工学部土木工学科
** ME Coastal Planning & Eng., Inc., Pres.
*** Coastal Planning & Eng., Inc., V. P.
**** Ph.D. フロリダ大学教授, Coastal & Oceanog. Dept.

非常に平坦な地形をなしているため、河川からの土砂の供給はほとんどないものと思われる。大西洋岸では、この州の北に位置するジョージア州や南北キャロライナ州にある大河川からの土砂が南下して barrier island の海岸が形成されたと考えられている。また、多くのインレットにおいてそれを安定させるための導流堤の北側で漂砂の堆積が、南側で侵食が見られる。これらのことより大西洋岸では漂砂の卓越方向は南であるといわれている。顕著な海浜変形が起こる気象条件は、夏期から秋期にかけてのハリケーンと冬期から春期にかけての North Easterns と呼ばれる嵐のふたつがある。ハリケーンは、南方のカリブ海で発生しフロリダ半島に接近するが、一般的に進行速度が早くそれによる影響時間はそれほど長くない。一方、North Easterns は、大西洋上の停滞性高気圧とその南側に位置する低気圧の気圧配置により発生し、北東の強風とそれによる高波浪が長期間継続するため、沿岸により多くの被害をもたらす。

フロリダ州の 800 miles (1280 km) の砂浜海岸における海岸の実態調査 (Florida DNR, 1986) の結果 (図-2) が示すように、約 543 miles (870 km) は侵食性海岸であり、そのうちの 140 miles (224 km) は激しい侵食海岸である。この侵食に対する対策として、州政府は 3.62 億ド

ルの養浜工事業の 10 年計画と 1.10 億ドルの再養浜事業の 10 年計画を提案した。

3.2 養浜工事業の計画と手順

フロリダ州において養浜工事業を行う場合の主な手順を図-3 に示す。まず、海岸管理の陸側境界になる Coastal Construction Control Line の設定が、養浜事業を行う上での絶対なる必要条件である。米国では HWL (平均満潮面) まで海岸を個人の土地として所有することができるが、この Line が設定されているところでは、養浜によって HWL が前進してできる新しい海岸は個人の所有にならず公共のものとなる。事業の初期計画において最も重要なことは、費用・便益分析である。この分析より得られる便益と費用の比が連邦政府が定めた値より大きくならないと、連邦政府からの補助金が交付されず、養浜事業はほとんど実施不可能となる。実施計画で養浜工事の詳細設計や環境影響評価、詳細な費用の算出を行い、養浜工事の許認可を申請する。事業の実施においては、環境、特に工事中の水質と珊瑚礁への影響を調査する詳細なモニタリングが行われる。事後調査と事業評価は、再養浜による維持管理と密接に関連しており、再養浜の時期を決定するデータを得るためにほぼ毎年行われている。

3.3 養浜工の工学的な手法

工学的な手法に関しては、今だ確立されたものがあるわけではなく、多くの場合試行錯誤的に行われているが、そのなかでも養浜海岸の設計で重要となる養浜砂量の算

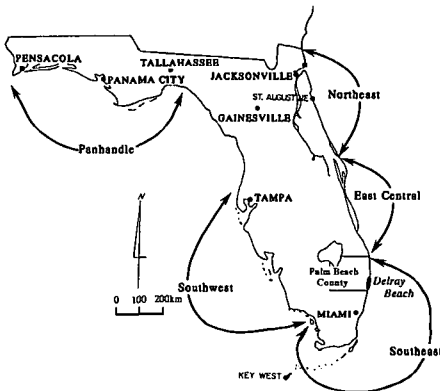


図-1 フロリダ州の海岸と Delray 海岸の位置

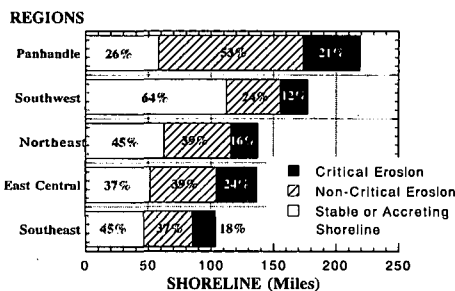


図-2 フロリダ州の海岸の状況

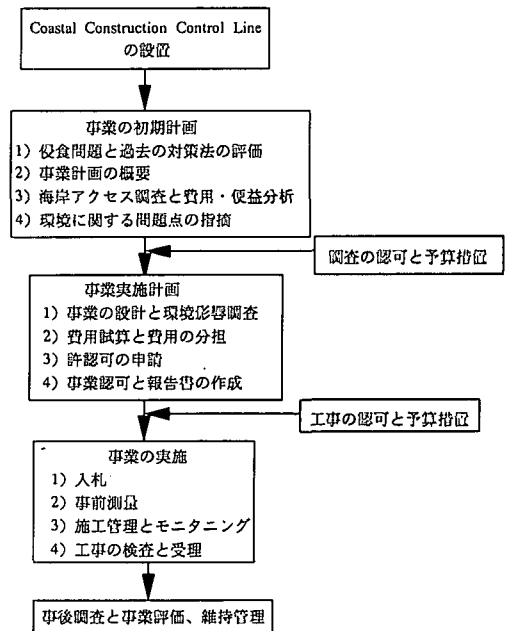


図-3 フロリダ州における養浜工事業の手順

定と再養浜の頻度を定める最新の手法および便益解析の手法を紹介する。

a) 養浜砂量と再養浜の頻度に関する方法

初期養浜砂量は、計画養浜砂量と先行養浜砂量とからなっている。計画養浜砂量は、養浜工を施すことによる海浜幅の拡大によって得られる高潮災害防止とレクリエーションの利益からその造成費用を差引いた正味の利益が最も最大になるのに必要な海浜幅より最適な土砂量が決められる。従って、計画養浜海浜は、常にこの海浜を維持していかなばならないもので、費用・便益分析を行ったうえで決められる。先行養浜砂量は、次の再養浜までに侵食されるであろう土砂量である。この量を求めるためには、養浜海浜での侵食量を推定する必要がある。この侵食量 E_T は、次式で与えられると仮定する (C. P. E., 1992)。

$$E_T = E_N + E_D \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 E_N は養浜前の現地における長期の経験的な侵食量 E_B に基づく養浜海岸のバックランドな侵食量、 E_D は養浜により生じる近隣海岸との平面形状の不連続性によって起こる侵食量 (末端侵食量) である。

E_N は、沿岸漂砂量 I_L と波の沿岸方向のエネルギー束 P_L との関係式 $I_L = KP_L$ おける漂砂量係数 K より次式で与えられる。

$$E_N = E_B \frac{K_B}{K_L} \quad \dots\dots\dots (2)$$

上式の K_B, K_L は、それぞれ養浜前の現地海岸と養浜海岸の漂砂量係数を表しており、漂砂量係数 K は米国陸軍工兵隊により次式が提案されている (USACE, 1985)。

$$K = 0.1637 \log(gH_b/w^2) - 0.0773 \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 g = 重力加速度、 H_b = 砕波波高、 w = 沈降速度。

末端侵食量 E_D の算定は、土砂の質量保存則と線形化された漂砂量式より海岸線の変化 y を表す次の基礎式 (Pelnaud-Considere, 1956; Dean, 1989) に基づいている。

$$\frac{\partial y}{\partial t} = G \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$G = \frac{KH_b^2 \sqrt{gk}}{8(s-1)(1-p)(h_*+B)} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 G は沿岸拡散係数と呼ばれ、 s は砂と海水の密度比、 p は砂の空隙率、 k は砕波波高と水深の比、 h_* は移動限界水深、 B はバーム高さを表している。式 (4) の解析解を用いると養浜海岸 (延長 L) に残留する養浜砂の割合 M は次式により求められる (Dean, 1992)。

$$M = \frac{2\sqrt{Gt}}{L\pi} \left\{ \exp\left(-\frac{L}{2\sqrt{Gt}}\right)^2 - 1 \right\} + \operatorname{erf}\left(\frac{L}{2\sqrt{Gt}}\right) \quad \dots\dots\dots (6)$$

養浜後 n 年目における末端侵食量 E_{Dn} は、残留する養浜砂の割合 M と初期養浜砂量 V_0 から次式で算定できる。

$$E_{Dn} = V_0(M_{n-1} - M_n) \quad \dots\dots\dots (7)$$

よって、 n 年目に存在する養浜砂量 V_n は次式で表せる。

$$V_n = V_0 - \left(\sum_{i=1}^n E_{Ni} + \sum_{i=1}^n E_{Di} \right) \quad \dots\dots\dots (8)$$

b) 便益解析

養浜工によって得られる便益は、レクリエーション利益と高潮災害防止利益の2種類がある。レクリエーション利益は、人間が海岸をレクリエーションの目的で利用することにより経済的な価値があるという考え方で、養浜事業により拡大された海岸はより多くの人に利用され、この利用者の増加が利益をもたらす。この利益を算定するに当たり考慮される要因は、(1) 海岸利用の需要の現況と将来、(2) 海岸利用の価値、(3) 海岸へのアクセスの可能性、(4) 海岸容量の現況と将来、(5) 海岸利用の制限、(6) 海岸線の後退である。

高潮の防災に関する利益は、養浜工施工前の海岸条件のもとで起こるであろう高潮災害とその施工後の海岸条件で起こりうる高潮災害との差によって得られる。高潮災害は、ある特定の大きさと頻度の時化によってもたらされ、海岸防災施設や道路、建物、土地などの損失や被害を金銭で評価することになる。これら構造物の損失や被害は、バッファーとしての海浜が侵食され、構造物前面のバームが最低設計バーム高よりも低くなったときに起こるとしている。

3.4 Delray 海岸の養浜工事業

a) 養浜プロジェクトの概要

表-1 Delray 海岸養浜事業に関するデータ

	初期養浜 (1973)	第1回再養浜 (1978)	第2回再養浜 (1984)	第3回再養浜 (1992)
工事延長	4.27 km	2.72 km	4.27 km	2.72 km
計画海浜幅	30 m (HWL)	30 m (HWL)	25 m (berm)	30 m (berm)
養浜砂量	$1.25 \times 10^6 \text{ m}^3$	$0.54 \times 10^6 \text{ m}^3$	$0.63 \times 10^6 \text{ m}^3$	$0.78 \times 10^6 \text{ m}^3$
費用	2.12百万ドル	1.50百万ドル	4.23百万ドル	6.02百万ドル
便益・費用比	1.80	1.50	3.30	2.53

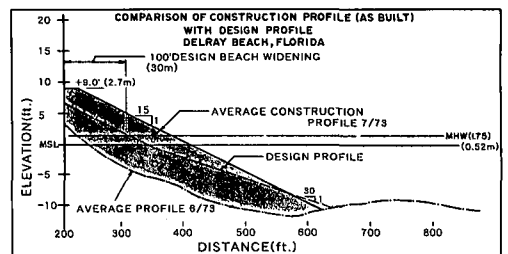


図-4 初期養浜工における海浜断面図

Delray 海岸は、図-1 に示すようにマイアミ海岸の北 80 km の大西洋岸の海岸で、Palm Beach 郡の南部に位置している。養浜事業以前においては、事業地域の海岸は年 $2.5 \text{ m}^3/\text{m}$ の割合で侵食され、HWL 時には乾燥した砂浜がない状態であり、小規模な時化によっても海岸沿いの国道が被災した。このため、1967 年に緊急対策として約 1.1 km のコンクリート護岸が建設されたが、侵食を食い止めるには至らず 1970 年には護岸が被災した。このような激しい侵食とレクリエーションのための海岸がないことから、1973 年以降、表-1 に示すように、海浜の回復のための養浜と再養浜が実施されている (C. P. E., 1992)。1973 年の 6 月から 7 月にかけて Palm Beach 養浜事業における Delray 海岸工区が建設され、 $1.25 \times 10^6 \text{ m}^3$ の土砂が、建設地域の約 750 m 沖合いの海底から浚渫されて、4.25 km の海岸に置かれた。1978 年に 0.54×10^6

m^3 の土砂が海岸線の侵食の激しい部分に再養浜された。1984 年に 2 度目の再養浜として $1.00 \times 10^6 \text{ m}^3$ の土砂が、初期養浜と同じ延長 4.25 km の全海岸に置かれた。初期養浜の計画断面図を図-4 に、平面図を図-5 に示す (Strock and Associates, 1983)。

b) モニタリング調査

1973 年の初期養浜の建設以来、養浜海岸のモニタリングとして 1 年ごとに海浜と深淺測量および底質採取が行われている。1973 年から 1978 年までは 120 m 間隔の測線が用いられ、砂丘の陸側から水深 6 m 付近までが測量された。1979 年以後は、フロリダ州の自然資源局 (DNR) が設けた 300 m 間隔の測線が用いられている。養浜区間内の測線は、図-5 に示すように、R-175 から R-188 までの 14 本である (C. P. E., 1992)。

i) 海浜断面変化

図-6 は、R-184 における初期養浜と再養浜の前後の代表的な海浜断面変化を示している。養浜前後での海浜断面の変化に関する顕著な特徴は、海浜幅が著しく拡大したことは当然であるが、それとともに海浜勾配が緩やかになったことである。特に、汀線から水深 10 ft (3 m) の海浜部の平均的な勾配が、養浜前の約 1/20 から養浜後の約 1/45 と緩やかになっている。

ii) 汀線変化

汀線変化に関しては、養浜が施された海岸のみでなく周辺海岸への影響を調べる目的で、周辺海岸の測量データがある 1974 年と 1990 年の汀線の位置 (C. P. E., 1990) を比較した。養浜海岸から南北へ約 4 km まで延長して比較を行った。この比較より得られた 16 年間の汀線変化の結果を図-7 に示す。養浜海岸の区域では、この期間で汀線が平均 88 ft (26 m) 前進しており、また 1973 年の養浜以前と較べると汀線が平均 142 ft (43 m) 前進している。養浜海岸の近傍の海岸では、養浜砂の流入により顕著な汀線の前進が起こり、南北約 3.2 km までその影響が及んでいる。汀線の前進量は、北側の海岸で平均 61 ft (18 m) あるいは年約 1.1 m、南側の海岸では平均 55 ft (16 m) あるいは年約 1.0 m となっている。このように養浜工は、それが施された海岸ばかりでなく、広範囲の周辺海岸における侵食対策として有効であることが明らかである。Delray 海岸の近隣海岸における海岸線の前進により得られる便益を計算したところ、年 1.56 百万ドルとなり、これを加えると Delray 海岸の養浜事業に対する便益・費用比は 2.5 から 4.0 に上昇する。

iii) 養浜砂量の変化

養浜砂量の測定値と 3.3 で示した方法による推定値を図-8 に示す。比較的単純な数値モデルでも実際の養浜砂量の経年変化を妥当な範囲で推定できることが分かる。1981 年の特異な侵食は大規模な時化によるものと思

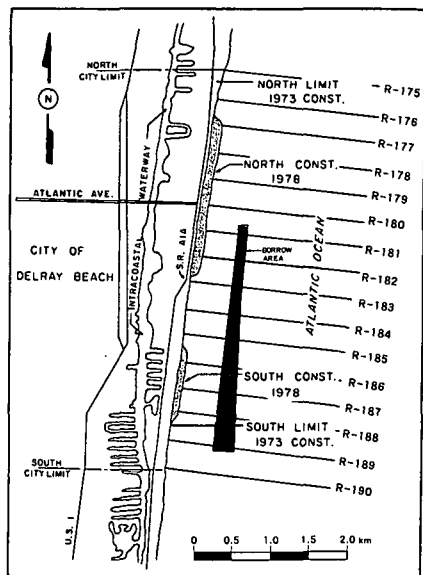


図-5 Delray 海岸における養浜海岸平面図

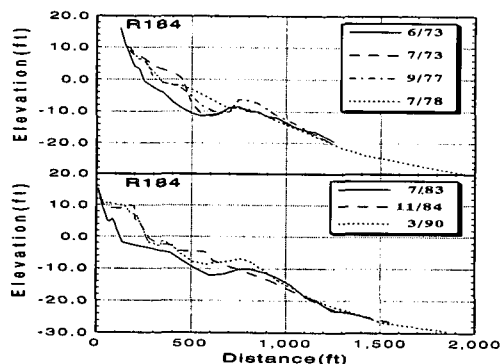


図-6 初期養浜と再養浜の前後の海浜断面変化 (R-184)

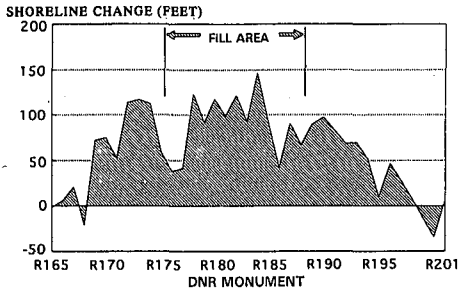


図-7 養浜海岸とその周辺海岸の汀線変化 (1974-1990)

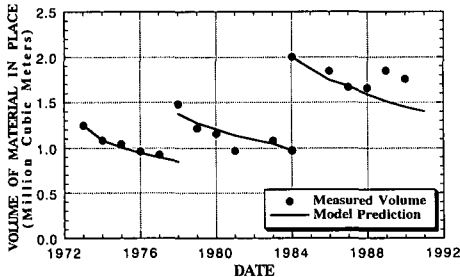


図-8 養浜砂量の経年変化の実測値と推算値

われ, 1989 年からの堆積傾向は短期的な傾向だと思われる。この図から, 養浜砂の変化を見ると, 年間流失量は, 初期養浜前の 4 ~ 25 倍程度になっており, 養浜砂投入直後が最も大きく, 1973 年から 1977 年の 4 年間で 0.46 百万 m^3 ($27 \text{ m}^3/\text{m}/\text{yr}$) の流失が見られた。再養浜ごとの各々の期間における侵食パターンはほぼ一定している。また, 養浜海岸の陸側の砂丘は, 初期養浜以来, 7.8 万 m^3 の堆積 (平均堆積率 $2.33 \text{ m}^3/\text{m}/\text{yr}$) が起こり, 植栽等の維持管理は必要だが, 自然の力で砂丘が発達する様子が見えてくる。

4. あとがき

近自然的な砂浜海岸を維持する養浜工法の歴史と技術的な進歩を紹介するとともに積極的に養浜事業を展開している米国フロリダ州の事業プロセスと工学的な設計手順を明らかにした。Delray 海岸における 20 年間のモニタリング調査が示すように, 養浜海岸の近傍の海岸では養浜砂の流入により顕著な汀線の前進が起こり, 養浜工が広範囲の海岸の侵食対策として有効であることが判明した。この堆積により周辺海岸では, まったく費用なしで養浜工によってもたらされる種々の利益が得られることになる。また, 比較的簡単な数値モデルで実際の養浜砂量の経年変化を妥当な範囲で推定できることが分かった。なお, 本研究は, 著者の一人小島が九州共立大学海外短期研修制度により 3 ヶ月間のフロリダ大学滞在中に行われたものである。

参考文献

- 田中茂信, 小荒井衛, 深沢 満 (1993): 地形図の比較による全国の海岸線変化, 海岸工学論文集, 第 40 巻, pp. 416-420.
- Coastal Planning & Engineering (C. P. E.), Inc. (1990): City of Delray Beach Second Periodic Beach Nourishment Project, 65-Month Follow-up Study, Florida, pp. 1-22.
- Coastal Planning & Engineering (C. P. E.), Inc. (1992): General Design Memorandum Addendum for Third Periodic Nourishment at Delrey Beach with Environmental Assessment, Boca Raton, Florida, pp. A1-A21.
- Dean, R. G. (1974): Compatibility of borrow material for beach fills, Proc., 14th Int. Conference on Coastal Engrg., ASCE, pp. 1319-1333.
- Dean, R. G. (1983): Principles of beach nourishment, CRC handbook of coastal processes and erosion, P. D. Komar, ed., CRC Press, Boca Raton, Fla., pp. 217-232.
- Dean, R. G. (1989): Short Course on Principles and Applications of Beach Nourishment, Chapter 3, University of Florida, Gainesville, pp. 1-47.
- Dean, R. G. (1992): Beach Nourishment: Design Principles, Proc. of the Short Course on Design and Reliability of Coastal Structures, pp. 217-232.
- Florida Department of Natural Resources (DNR) (1984): Beach Restoration: A State Initiative, Tallahassee, FL, pp. 1-103.
- Florida Department of Natural Resources (DNR) (1986): A Proposed Comprehensive Beach Management Program for the State of Florida, Tallahassee, FL, pp. 1-128.
- Hall, J. V. (1952): Artificially nourished and constructed beaches, Beach Erosion Board, Tech. Memo, No. 29, pp. 1-18.
- James W. R. (1974): Beach fill stability and borrow material texture, Proc., 14th Int. Conference on Coastal Engrg., ASCE, pp. 1334-1349.
- Krumbein, W. C. and James, W. R. (1965): A log-normal size distribution model for estimating stability of beach fill material, Tech. Memo. No. 16, U. S. Army Coastal Engrg. Res. Ctr., Washington, D. C., pp. 1-94.
- Pelnard-Considere, R. (1956): Essai de Theorie de l'Evolution des Formes de Rivage en Plages de Sable et de Galets, 4th Journees de l'Hydraulique, Les Energies de la Mer, Question III, Rapport No. 1.
- Pilarczyk, K. W., and van Overeem, J. (1987): Manual on artificial beach nourishment, Report 130, Ctr. for Civ. Engrg. Res., Rijkswaterstaat and Delft Hydr., The Netherlands.
- Strock and Associates (1983): Schematic Design Report, 1984 Delray Beach Maintenance Nourishment Project, Deerfield Beach, FL, pp. 1-70.
- Toyn, C. and Pilkey, O. (1988): An historical survey of beach replenishment on the U. S. Atlantic barrier coast: good news for Florida, Beach Preservation Technology Conf. Gainesville, FL, pp. 135-150.
- U. S. Army Corps of Engineers (A. C. E.), Coastal Engineering Research Center (1985): Sediment size and fall velocity effects on longshore sediment transport, CETN II-11, pp. 18-25.
- Wang, H. (1989): Short Course on Principles and Applications of Beach Nourishment, Chapter 1, University of Florida, Gainesville, pp. 1-17.