

吸水による漂砂制御に関する研究

佐藤 道郎*・福島 正寛**・坂元 龍治***・中村 和夫****

1. ま え が き

前浜付近に埋設した集水管で砂浜内部の水を排水して砂を吸着させ海浜変形を制御しようとする方法(Coastal Drain System)は、目に見える部分がありなく、自然の景観を損ねるところが少ないという点で望ましい性質を持った方法である。そのほかにも従来の方法と比べ、設置が簡単、周辺環境に与える影響が少ない、安価であるといった多くの有利な点が示されている(Parks (1989), Vesterby (1991))。

しかし、一方、Bruun (1989)はこの方法が比較的緩やかな波浪条件下だけで機能するものであって、時化のような波浪条件下では侵食されること、その後の回復が早められるといっても、自然の回復力もかなりあること、その割には費用が掛かり、養浜の方が良いことを述べ、この方法に対し消極的な見解を示している。

このように、この方法についてはその有効性について必ずしも共通の認識が得られているわけではなく、また、その議論もこの方法の機能に対する十分な理解に基づいているとは言い難いように思われる。

著者の一人は、この方法の有効性を調べるために行った平面水槽実験のあらましを報告した(佐藤・秦, 1992)。そこでは、この方法の主要な機能として従来より考えられている前浜への砂の吸着による堆積だけでなく、吸水がサーフゾーン全体の水理条件に影響し、その結果として単に堆積性の波浪条件下で前浜への砂の堆積を促進するだけでなく、侵食にも抵抗し、侵食性の波浪条件下でも侵食を遅らせる効果があることを示唆した。

吸水量を増せば侵食を遅らせるだけでなく、堆積性に変えることの可能性も考えられるが、しかし、吸水量の制御が出来ず、その点については不明であった。

そこで、本研究では吸水量によってこの方法の効果にどんな違いがあるのか、侵食性の条件を堆積性に変えることが出来るのかといった点について実験的に調べた。

また、吸水によって漂砂帯の流れなどの条件が変化し、

それが海浜変形の様相を変えているようにも思われる。例えば、吸水により波の遡上が弱められ、undertowなどの沖向き流れの変化をもたらしことも考えられ得る。底面の波動境界層の変化やそれに関連して底質の移動限界の変化に加え、そういった事柄が少しははっきりしてくるとこの方法がどの程度の可能性を持ったものかももう少し見えてくるように思われる。これらのいくつかの側面については河田ら(土屋・河田, 1980; 河田・Larsen, 1984)による先駆的な研究がある。そこでは漂砂帯全域の底面から一様に吸水する場合が対象となった。本研究では汀線に平行に埋設したパイプで吸水するシステムを対象として、それらの研究を道しるべとし、検討を加えようとしている。その第一歩として、吸水による遡上波について調べてみた。

本文はそれらのあらましを述べたものである。

2. 吸水による断面変化の実験

実験は幅 0.4 m、高さ 0.4 m (1部 0.7 m)、長さ 13 m の 2 次元水路を用いて行った(図-1)。実験水路に設けられた粒径 0.3 mm の砂からなる勾配 1/20 の砂浜に吸水管を埋設した。吸水管は 50 mm 径の硬質ポリエチレン製で、厚さ 1 cm のフィルター(ステラシート)で巻いたものである。これをモノフレックスポンプに接続して吸水した。これまでの実験結果では(佐藤・秦, 1992)汀線より海側のほうが効果が大きいので吸水管の位置は汀線より海側に限った。また、吸水管の砂の被りは 5 cm である。

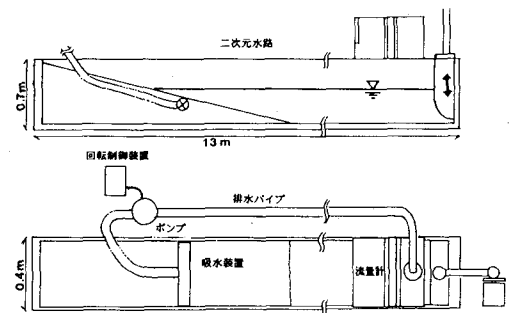


図-1 実験装置

* 正会員 工博 鹿児島大学教授 工学部海洋土木工学科

** 学生会員 鹿児島大学大学院 工学研究科

*** 日本舗道(株)

**** 正会員 鹿児島大学技官 工学部海洋土木工学科

吸水量を変化させるためにポンプには回転数制御装置を取り付けた。ポンプそのものはこれまで平面水槽で汀線方向7mの区間で吸水するのに用いたものと同じもので、それを0.4mの幅の水路に用いると能力がありすぎるようであった。そこで、回転数を半分と1/4に落として実験を行った。このときのポンプの吐出量はそれぞれ1.6 (1/s) および0.75 (1/s) であった。

吸水管を埋設すると吸水量は上述の吐出量よりも小さくなるが、実験中を通して吸水量が一定というわけにはいかず、吸水量が大きいので、吸水開始後吸水管直上の砂層は締め底面が幾分低下する。そこへ周辺の砂がよって堆積してくるが、この状況は波の条件によって異なる。したがって、実験開始後ある程度時間が経た後の吸水量は実験ケースによって堆積厚に応じ異なった。この吸水量は表-1に示されている。吸水量は三角ぜきで測定した。

実験波は表-1に示す周期、波高の規則波である。海浜断面の測定は台車取り付けたポイントゲージで2cm間隔で測定し、パーソナルコンピュータに入力した。

測定は、まず砂浜を一樣勾配断面にし、排水を始め、砂浜内部の地下水面が低下したところで波を作用させ、1時間後と2時間後に測定を行った。各測定時には波の平均的な遡上位置も記録しておいた。波の測定には8本の容量式波高計を用いた。

3. 結果と考察

前報で今回よりかなり小さな吸水量で堆積性の条件下では堆積を促進し、侵食性の条件下でも侵食に抵抗し、

侵食の速度を遅らせることを示した。今回の実験でも堆積性の条件下では同様の傾向が見られた。筆者らの関心はむしろ侵食性の条件下にあり、吸水で侵食の速度を遅くできるのであれば吸水量を増していけば侵食速度をさらに遅らせ、ついには堆積させるようになることも期待できるのではないかと考えてみた。そのような実験結果の一例を次に示す。

図-2は吸水しない場合、ポンプ回転数1/4(この場合の吸水量0.4 (1/s/m)) および1/2(同じく0.7 (1/s/m)) で吸水した場合の初期断面、1時間後および2時間後の断面変化を示したものである。

この例では、吸水しない場合に汀線のすぐ海側で侵食された部分が0.4 (1/s/m) の吸水では変化が無くなり、0.7 (1/s/m) ではかなり堆積するようになる。

実験中の観察では、吸水管の前後1m程の区間では砂漣が見られなかった(非吸水では見られたケースでも)。また、この区間では過マンガン酸カリウムを投入してもその溶解した着色水は上部に拡散することなく砂層に吸

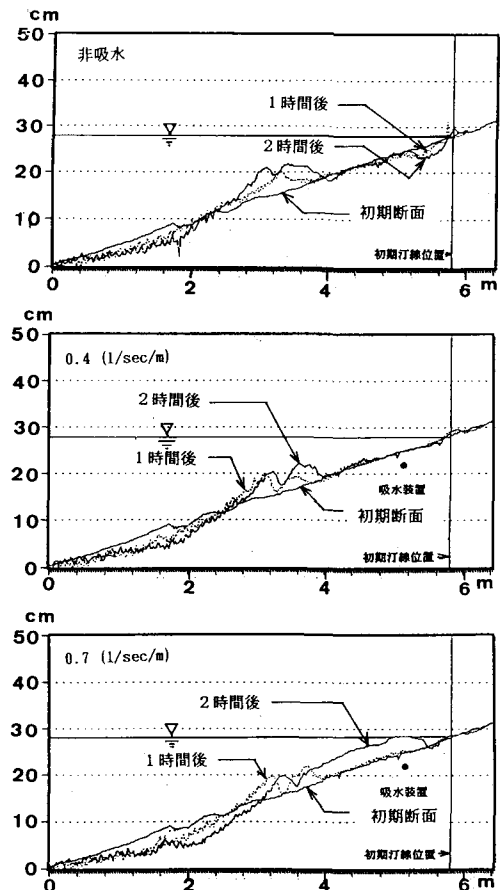


図-2 吸水量の違いによる断面変化の違い
(周期1.6秒、波高9.7cm)

表-1 実験条件

底勾配	周期(sec)	波高(cm)	吸水量(1/s/m)
1/20	1.8	10.0	0, 0.5, 0.8
		5.8	0, 0.5, 0.8
		3.1	0, 0.5, 0.8
	1.6	9.7	0, 0.4, 0.7
		5.8	0, 0.6, 1.0
		3.1	0, 0.8, 1.3
	1.3	7.5	0, 0.6, 1.0
		5.0	0, 0.6, 1.2
		3.8	0, 0.8, 1.8
	0.9	8.0	0, 0.9, 1.4
		6.9	0, 0.8, 1.3
		4.1	0, 0.8, 1.5
	0.8	7.2	0, 1.0, 1.5
		5.4	0, 1.0, 1.6
		3.6	0, 1.2, 1.6

い込まれていった。そして、その辺りでは底質自体の動きがいくぶん抑えられているようであった。

0.4 (1/s/m) の吸水では吸水管付近の断面が殆ど変化してないが、そのためであろうと思われる。かなりの堆積がみられる 0.7 (1/s/m) の場合との違いは碎波帯前後の平均流れの状況にある。非吸水の場合、この辺りでは中層に沖向きの流れが観察されるが、0.4 (1/s/m) の吸水では染料はそれほど勢いよく岸に向かうということではなかったが、沖へ戻ることもなかった。ところが、0.7 (1/s/m) の場合には岸に向かう（というより吸水管に向かう）ははっきりした流れが染料の動きにより観察された。この辺りの詳細については有効な測定手段を持ち合わせていないために大まかな観察に留まった。だが、この観察は、吸水管に向かう流れが、波による沖向きの平均流れに打ち勝ったときに、本来、侵食性の汀線後退型と考えられる条件下でも、汀線前進型に転じることを示唆しているように思われる。今後、この点の綿密な計測による検討が望まれる。

現在得られているデータを基に砂村ら (1974) に従って海浜断面のタイプ分けを行ってみた。図-3 はその結果である。(a) は吸水しない場合、(b) はポンプ回転数 1/4、(c) は 1/2 の場合の結果である。

これらの結果から、吸水量を増していくと、非吸水時には汀線の後退型であったものが前進型に転じ得ることが分かる。したがって、この方法が浜侵食を止め得ないとする前述の Bruun (1989) の見解は必ずしも当たるとは言えない。さらに、Bruun は dune erosion も止められないとしているが、前報の一連の実験中に、非吸水側では dune erosion が生じており、一方、吸水側には見られなかったケースがあり、吸水量と波浪条件との兼ね合いの問題と考えられる。したがって、どの程度の波の条件の場合、どの程度の吸水量が必要か、また、それが現実的か、といった点を詰めていかないと、決めつけられないと思われる。なお、吸水量の増加に伴って波の遡上高は減少したが、wave set-up 等の平均水位には変化はみられなかった (図-4)。

この方法については、運転経費が問題にされ、その前提に年中稼働させてなければならないと思われることが多いが、筆者らは必要な時に必要な程度働かせられる可能性を持った方法として、時化の際に侵食を軽減したり、回復を早めたり、養浜砂の安定化のための補助的な手段として興味を持っている。

4. 吸水時の波の遡上について

浸透がある場合の波の遡上は河田 (1979)、Packwood (1983)、Kobayashi (1990) によって検討されてきているが、それらの研究成果にならって集水管によって強制的

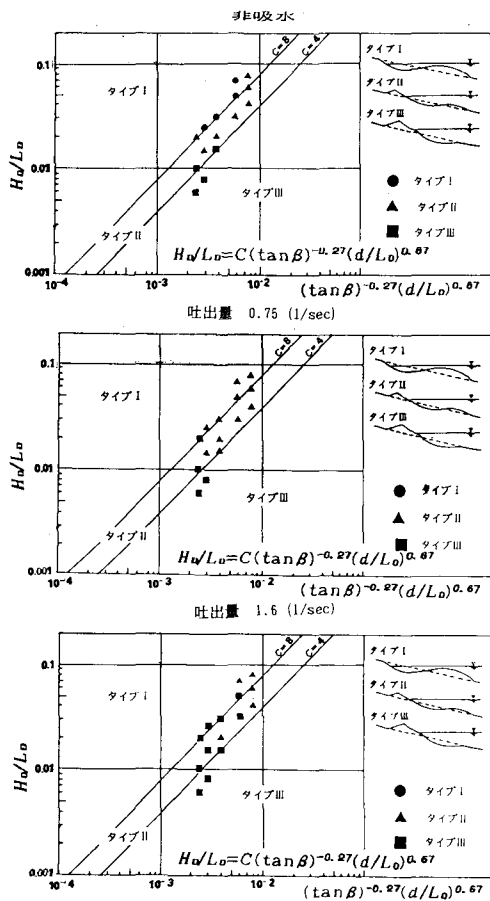


図-3 吸水に伴う海浜断面タイプの変化

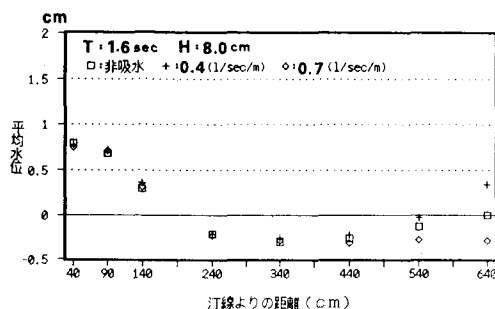


図-4 平均水位の変化

に吸水したときの波の遡上の計算を試みた。遡上計算の詳細は Roy (1986) を参考にした。理論の概要は次の通りである。

x' を水平座標、 z' を鉛直座標として 2 次元非圧縮流体の連続ならびに運動量方程式に長波近似を用い

$$\frac{\partial u'}{\partial t} + u' \frac{\partial u'}{\partial x'} + w' \frac{\partial u'}{\partial z'} = -g \frac{\partial \eta'}{\partial x'} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau'}{\partial z'} \quad \dots (1)$$

底は緩勾配とし、浸透流速を v^* で表すと、境界条件は次

で与えられる.

$$\frac{\partial \eta'}{\partial t'} + u' \frac{\partial \eta'}{\partial x'} = w' \quad \text{at } z' = \eta' \quad (2)$$

$$-u' \frac{d\bar{h}'}{dx'} = w' + v^* \quad \text{at } z' = -\bar{h}' \quad (3)$$

(1) 式を底から水面まで積分し, Leibnitz' rule と境界条件を用いて, 水平速度成分を深さ方向に一樣と仮定すると, 緩勾配斜面での有限振幅浅水波の連続ならびに運動量方程式が次のように得られる.

$$\frac{\partial h'}{\partial t'} + \frac{\partial}{\partial x'}(h'U') = -v^* \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t'}(h'U') + \frac{\partial}{\partial x'}\left(h'^2U' + \frac{g}{2}h'^2\right) + gh'\tan\theta' + \tau_b/\rho + U'v^* = 0 \quad (5)$$

ここに, $\tan\theta' = -dh'/dx'$.

次の無次元変数を導入する.

$$x = \frac{x'}{\sqrt{gh'T}}, \quad h = \frac{h'}{H}, \quad t = \frac{t'}{T'}$$

$$u = \frac{u'}{\sqrt{gh'}}, \quad v^* = \frac{v^*}{H'/T'}$$

$$\theta = \frac{\tan\theta'}{H'/(\sqrt{gh'T'})}, \quad \tau_b = \frac{\tau_b}{\rho g H'^2/(\sqrt{gh'T'})}$$

無次元化された支配方程式は次のようになる.

$\tau_b = f_w|u|u$ と表して,

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(hu) = -v^* \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(hu) + \frac{\partial}{\partial x}\left(u^2h + \frac{h^2}{2}\right) + \theta h + f_w|u|u + uv^* = 0 \quad (7)$$

吸水による浸透速度 v^* は, 図-5 に示すように底面から a の深さに強さ $-q'/2\pi$ の吸い込みがあり, 底面に対して鏡像の位置に強さ, $q'/2\pi$ の湧き出しがある場合の底面 x 軸上の速度 $-(aq')/\pi(x^2+a^2)$ で与えることとする. 図-6 に示す座標で無次元化された表現は次式で与えられる.

$$v = -\frac{aq}{\pi\{(x-x_0)^2+a^2\}} \quad (8)$$

有限振幅浅水波の計算に Hibberd & Peregrine (1979) は Lax-Wendroff 法を用いた計算法を示し, その後 Packwood (1983) や Kobayashi et al. (1987) らによって用いられている. (6), (7) の従属変数 u , h を流量 $m = hu$ として, 新たに保存量である質量と運動量を従属変数とする式に書き直すと

$$\frac{\partial \tilde{u}}{\partial t} + \frac{\partial \tilde{F}}{\partial x} + \tilde{G} = 0 \quad (9)$$

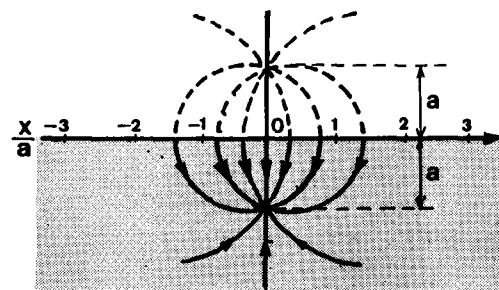


図-5 吸水のモデルと浸透速度の分布

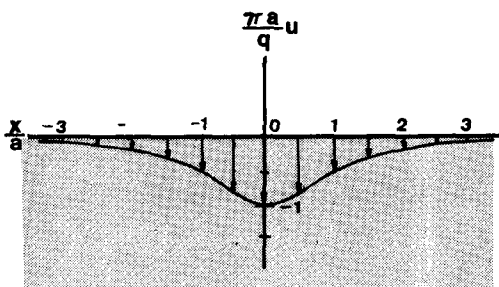


図-6 座標説明図

$$\tilde{u} = \begin{bmatrix} m \\ h \end{bmatrix}, \quad \tilde{F} = \begin{bmatrix} \frac{m^2}{h} + \frac{h^2}{2} \\ m \end{bmatrix}, \quad \tilde{G} = \begin{bmatrix} \theta h + \tau_b + \frac{m}{h}v^* \\ v^* \end{bmatrix} \quad (10)$$

$\tilde{u}_{j,n} = \tilde{u}(j\Delta x, n\Delta t)$ と表して, $\tilde{u}_{j,n+1}$ に対する差分式は

$$\tilde{u}_{j,n+1} = \tilde{u}_{j,n} - \lambda \left[\frac{1}{2}(\tilde{F}_{j+1,n} - \tilde{F}_{j-1,n}) + \Delta x \tilde{G}_{j,n} \right] + \frac{1}{2}\lambda^2(\tilde{g}_{j,n} - \tilde{g}_{j-1,n} - \Delta x \tilde{S}_{j,n}) + \tilde{D}_{j,n} \quad (11)$$

ここに,

$$\tilde{g}_{j,n} = \frac{1}{2}(\tilde{A}_{j+1,n} - \tilde{A}_{j,n}) \left[\tilde{F}_{j+1,n} - \tilde{F}_{j,n} + \frac{\Delta x}{2}(\tilde{G}_{j+1,n} + \tilde{G}_{j,n}) \right] \quad (12)$$

$$\lambda = \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (13)$$

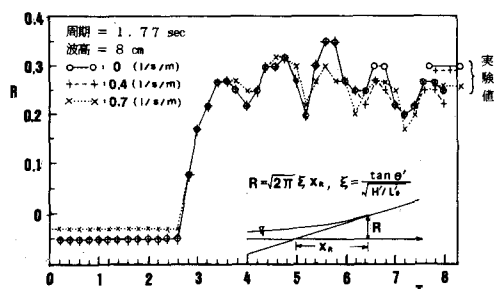


図-7 遡上高の計算結果

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} \frac{2m}{h} & h - \frac{m^2}{h^2} \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (14)$$

$$\begin{aligned} \tilde{S}_{j,n} &= \Delta x \left[\frac{\partial \tilde{G}}{\partial t} \right]_{j,n} \\ &= \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} \left(\theta - \frac{mv^*}{h^2} \right) (m_{j+1,n} - m_{j-1,n}) \\ + 2\Delta x v_{j,n}^* + \Delta x \left(\frac{\partial \tau_b}{\partial t} \right)_{j,n} \\ 0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (15) \end{aligned}$$

$(\partial \tau_b / \partial t)_{j,n}$ は Jonsson の摩擦式を用い

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial \tau_b}{\partial t} \right)_{j,n} &= 2f_w \frac{|u_{j,n}|}{h_{j,n}} \left[(u_{j,n}^2 - h_{j,n}) \frac{h_{j+1,n} - h_{j-1,n}}{2\Delta x} \right] \\ &+ u_{j,n} \left(\frac{m_{j+1,n} - m_{j-1,n}}{2\Delta x} + 2\Delta x v_j^* \right) \\ &- \theta_j h_{j,n} - f_w |u_{j,n}| u_{j,n} - \frac{m_{j,n}}{h_{j,n}} v_j^* \dots\dots\dots (16) \end{aligned}$$

$\tilde{D}_{j,n}$ は段波の付近で生じる parasitic wave を減衰させるために導入された散逸項である。

図-7 は汀線から 0.5 m 海側に埋設した時の遡上高の計算結果を示している。横軸は周期で無次元化した時間である。図-5 の浸透速度の分布から遡上域で強制浸透量は小さく、遡上高の変化は小さい。しかし、吸水時には非吸水より幾分遡上高さが小さくはなっている。図の右に最大遡上高の平均の実験結果を示したが、計算と大体似た結果となっている。

5. あとがき

Coastal Drain System で吸水量を増していくとどうなるか実験的に検討した。その結果、吸水しない場合には汀線付近が侵食されるような条件下でも吸水量を大き

くしていくと堆積性に転じ得ることが分かった。これは、このシステムが浜の侵食を止め得る可能性を持つことを示している。

また、観察によれば吸水によって漂砂帯に生じる吸水管へ向かう流れが、波によって生じる冲向きの流れに打ち勝つとき、その変化が生じ得ることが考えられた。この点は、綿密な測定や解析によって検討する必要があると思われた。

実験的には、岸沖漂砂に基づく侵食を防ぐ可能性が示されたが、これが現地規模で現実的かどうかについても検討を進めていく必要がある。

本研究を進めるにあたり、米盛誠心育成会の補助を得たことを記し謝意を表します。

参 考 文 献

- 河田恵昭・土屋義人 (1979): 透水性海浜における孤立波の遡上機構, 第 26 回海岸工学講演会論文集, pp. 75-79.
- 河田恵昭・L. H. Larsen (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.
- 佐藤道郎・秦 禎勝 (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.
- 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, 第 27 回海岸工学講演会論文集, pp. 270-274.
- Bruun, P. (1989): The coastal drain: What can it do or not do?, Journal of Coastal Research, 5-1, pp. 123-125.
- Hibberd, S. and D. H. Peregrine (1979): Surf and run-up on a beach: A uniform bore, J. Fluid Mech., Vol. 95-2, pp. 323-345.
- Kobayashi, N., Otta, A. K. and I. Roy (1987): Wave reflection and run-up on rough slopes, J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, ASCE, Vol. 113 No. 3.
- Kobayashi, N. and A. Wurjanto (1990): Numerical model for waves on rough permeable slopes, Journal of Coastal Research, SI-7, pp. 149-166.
- Packwood, A. R. (1983): The influence of beach porosity on wave uprush and backwash, Coastal Eng., Vol. 7, pp. 29-40.
- Parks, J. M. (1989): Beachface dewatering: A new approach to beach stabilization, THE COMPASS, Vol. 66, No. 2, pp. 65-72.
- Roy, I. (1986): Numerical simulation of wave run-up on steep rough slopes, thesis presented to the University of Delaware in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Civil Engineering.
- Sunamura, T. and K. Horikawa (1974): Two dimensional beach transformation due to waves, Proc. 14th ICCE, pp. 65-72.
- Vesterby, H. (1991): Coastal drain system-a new approach to coastal restoration, Proc. of the Int. Conf. on Geotech. Eng. for Coastal Development, pp. 651-654.