

現地資料に基づく越波による土砂堆積量の定式化とその検証

Verification of New Washover Formula with Field Measurements Data

Nguyen Xuan Tinh¹・田中 仁²・Chantal Donnelly³・Magnus Larson⁴

Xuan Tinh NGUYEN, Hitoshi TANAKA, Chantal DONNELLY and Magnus LARSON

Prediction of overwash occurrence can provide valuable planning information for local authorities, emergency services, and coastal residents. Based on those proposes a new empirical formula for predicting deposited washover volume was derived. The new formula was developed by modifying the assumptions of previous empirical models using new assumptions based on the governing physical processes by taking into account the excess runoff height over the beach crest and the duration of the overwash event. The empirical coefficient was calibrated using field data sets from United States. Verification of the model with a further fourteen field data sets was shown that the formula yields predictions are comparable to the measured field data with most of predicted overwash volumes falling within a factor of two.

1. はじめに

地球温暖化に伴う水面上昇は世界の海浜地形に大きな影響を及ぼすものと危惧されている。特に、海面の上昇によりバリアーアイランドの越波が顕在化し、背後のラグーン内への土砂の堆積など顕著な地形変化を来す可能性がある (Titus, 1998)。このような環境の保全のためには、バリアー上の越波による砂移動に関して、ダイナミックスに立脚した検討が必要である。しかし、通常、漂砂移動の研究対象となるのは沖浜から遡上帯までとすることが多く、平常時には平均水面上にある海浜部の地形変動に関しては十分な知見が蓄積されていない。この理由の一つは、地形変化が突発的な暴浪時に生じるため、精度の高い現地データの蓄積が少ない点が挙げられる。

これまで、越波に伴う土砂移動・海浜地形変化に関して、Williams (1978), Tanaka ら (2002), Donnelly ら (2004), Donnelly ら (2006), Nguyen・田中 (2007) などがある。ただし、これらの論文においては個々の研究対象の現地における詳細な研究行っているもの、総合的な検討はなされていない。

そこで、本研究では日米の精度の高い現地データを収集し、越波に伴う堆積土砂量に関する検討を行い、新たな定式化を行った。

2. 現地資料

本研究においては、下記の様に米国および我が国におお高波浪時の越波による土砂堆積に関する現地資料を収集した。以下では、各調査サイトの特徴やデータ特性に関して概説する。

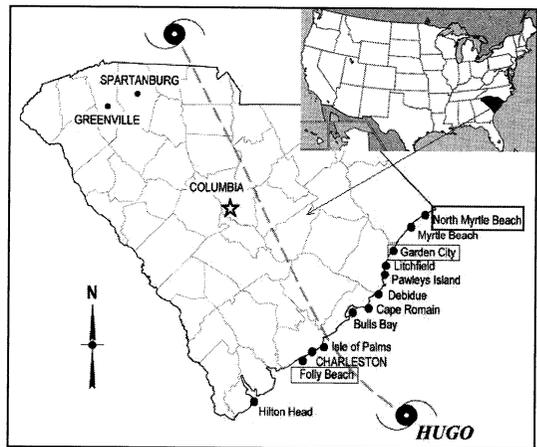


図-1 米国サウスカロライナ州沿岸域

(1) Folly Beach

米国サウスカロライナ州 Folly Beach の位置を図-1に示す。1989年9月に西アフリカに発生したハリケーン・ヒューゴは大西洋を横断する間にカテゴリー5に分類されるまでに発達し、中心気圧は918mbに達した。図-2は米国サウスカロライナ州 Folly Beach において実測された、ハリケーン・ヒューゴ来襲時の越波発生前後の地形を比較したものである (Eiser・Birkemeir, 1991)。Folly Beach はバリアーアイランドに形成された砂浜で、その背後にはラグーンが存在する。図-2に示された様に、ハリケーンの上陸位置に近接している。ハリケーン発生前には凸状の砂丘地形が発達していたが、事後にはこれが平坦化されるとともに、岸側への底質移動が確認される。なお、ハリケーン・ヒューゴは同海岸において激しい侵食をもたらし、その後、大規模な養浜が行われた。図-2に示された海浜断面の実測は、1988年11月5日および1989年11月1日に実施されており、ハリケーンの来襲による越波が生じてから10日後にあたる。図-1に示された

1 学生会員	MSc.	東北大学大学院 工学研究科土木工学専攻
2 フェロー	工博	東北大学教授 工学研究科土木工学専攻
3	Ph.D.	Dept. Water Resources Eng., Lund Univ.
4	Ph.D.	Dept. Water Resources Eng., Lund Univ.

データより、各測線における砂の堆積量を正確に見積もることが可能である。なお、調査域における50%粒径 d_{50} は0.17mmである。

(2) Garden Beach

Garden Beach はハリケーン・ヒューゴの上陸位置から北東にほぼ100kmの距離にあり、Folly Beach と同じくサウスカロライナ州に位置する(図-1)。図-3に示すとおり、Folly Beach と同様にハリケーン来襲時に顕著な越波による地形変化が生じた(Eiser・Birkemeir, 1991)。事後の測量はハリケーン上陸の6日後に実施された。なお、調査海浜における底質粒径 $d_{50}=0.44\text{mm}$ である。

(3) North Myrtle Beach

この海浜も図-1に示されたとおり米国サウスカロライナ州に位置し、ハリケーン・ヒューゴによる高波時に顕著な地形変化が生じた(Eiser・Birkemeir, 1991)。地形の観測結果を図-4に示す。

(4) Santa Rosa 島

Santa Rosa 島は米国フロリダ州西部パンハンドル地区に位置している。同地区には1995年に数ヶ月の間隔でハリケーン・アリソン、ハリケーン・エリン、ハリケーン・オパールが次々と来襲し、大きな被害を受けた。Santa Rosa 島はこの地区に位置する長さ95kmほどのバリアーアイランドである。その幅は160mから1,900m程度であり、平均幅は510m、平均海面から前浜最頂部までの高さは4.12mである。調査海浜における底質粒径 $d_{50}=0.26\text{mm}$ である。

詳細な海浜断面の変化が1995年ハリケーン・オパールおよび1998年ハリケーン・ジョージの来襲時に得られている(Stoneら, 1991)。それぞれの地形の観測結果を図-5、図-6に示す。バリアーアイランドの背後にはPensacola 湾があり、図-5において特に砂丘の侵食・土砂の輸送が著しい。

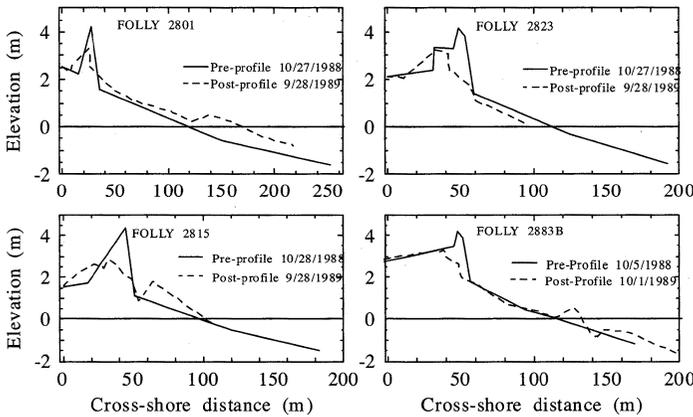


図-2 Folly Beachの海浜断面変化 (Eiser・Birkemeir, 1991)

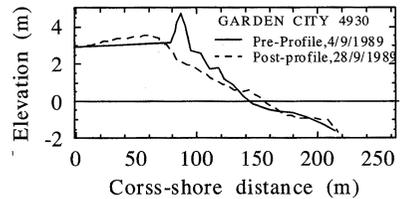


図-3 Garden Cityの海浜断面変化 (Eiser・Birkemeir 1991)

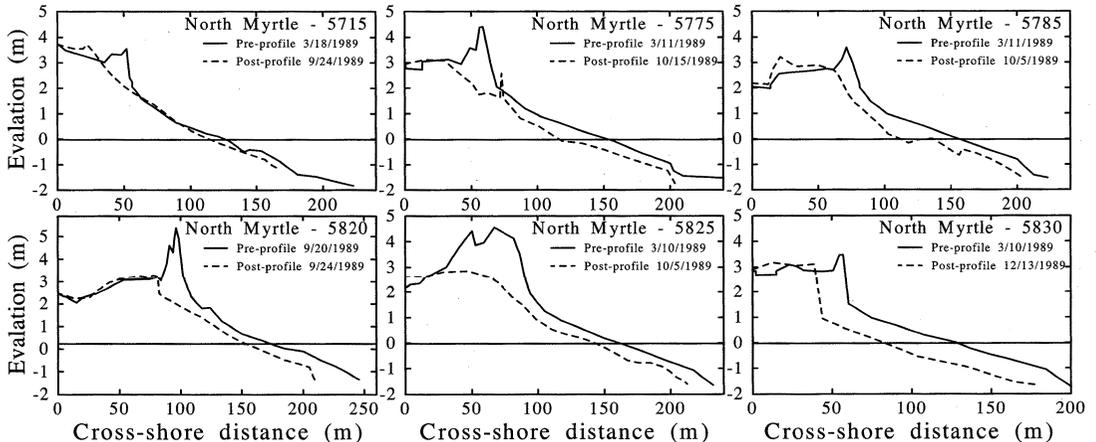


図-4 North Myrtle Beachの海浜断面変化 (Eiser・Birkemeir, 1991)

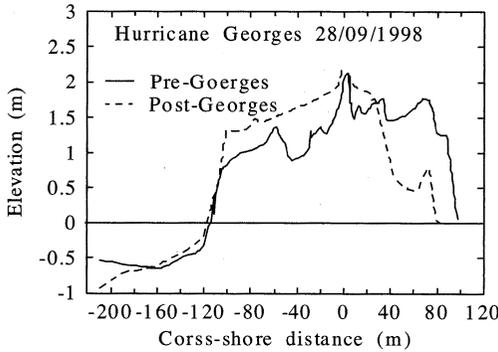


図-5 Santa Rosa島の海浜断面変化 (Stoneら, 2004)

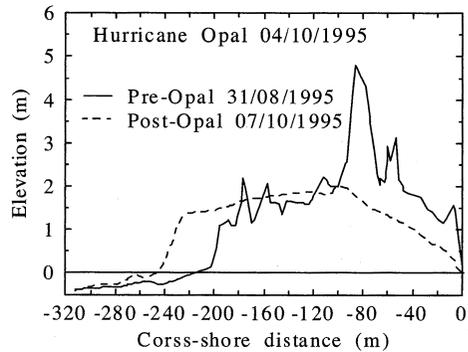


図-6 Santa Rosa島の海浜断面変化 (Stoneら, 2004)

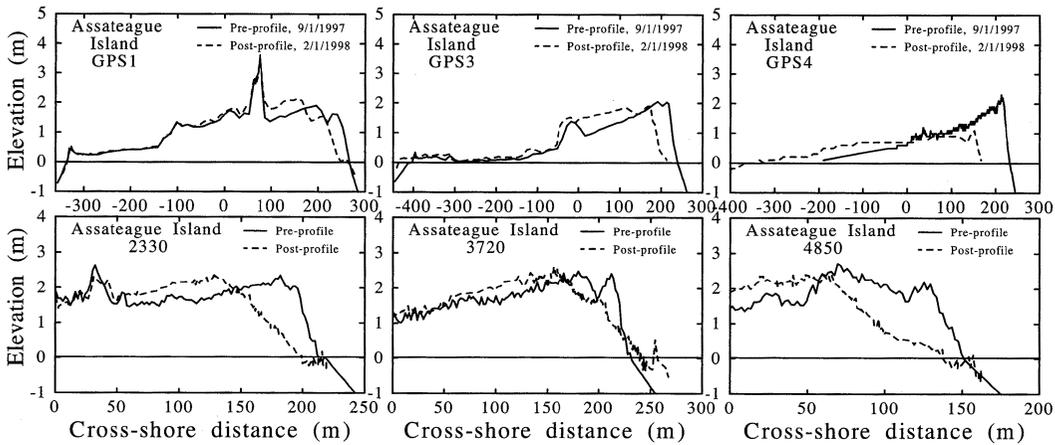


図-7 Assateague Coastの海浜断面変化 (Larsonら, 2004)

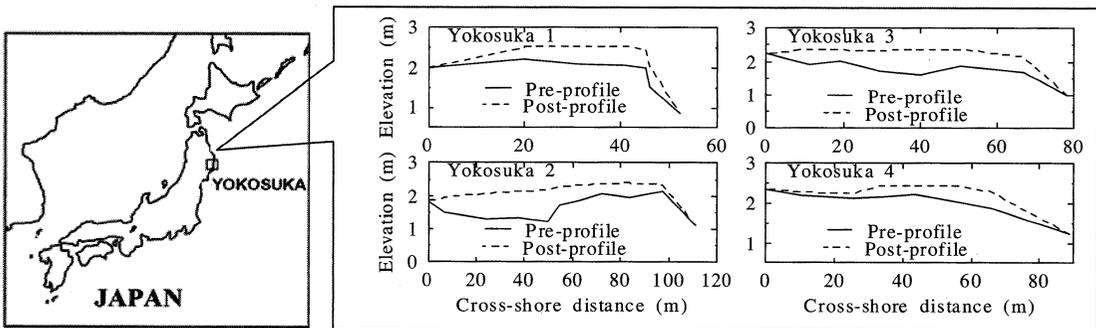


図-8 横須賀海岸における海浜変化 (Nguyen・田中, 2007)

(5) Assateague 島

Assateague 島は米国メリーランド州からバージニア州にかけて位置する長さ約60km のバリアーアイランドである。1998年1月, 2月に「ノーイスター」(Nor'easter) と呼ばれるアメリカ合衆国北東部を襲った低気圧による暴浪時に越波による地形変化が生じた。その前後(1997年9月1日, 1998年2月)に, USGS および NOAA によりレーザー高度計(LIDAR)を用いた詳細な地形測量が行われた(Larsonら, 2004)。その結果を図-7に示した。調査海浜における底質粒径 $d_{50}=0.30\text{mm}$ である。

(6) 宮城県横須賀海岸

2006年10月上旬に東北地方太平洋沿岸を北上した低気圧は「爆弾低気圧」と呼ばれ、宮城県・女川港沖でのサンマ漁船転覆を引き起こし、乗組員16名全員の人命が失われた災害として記憶に新しい。この低気圧による暴浪時に、宮城県横須賀海岸において大規模な越波による土砂堆積が生じた(Nguyen・田中, 2007)。新旧砂面高さを実測した結果を図-8に示す。図に見られるように、堆積層厚は最大で1mにも達していることが分かった。同様な新旧海浜断面の実測を合計5側線において実施した。

表-1 使用したデータセット

	データ名	ハリケーン等の名称	発生年月日	堆積量 (m ³ /m)
キャリブレーション	Folly Beach 2801	Hugo	1989/9/22	4.75
	Folly Beach 2815	Hugo	1989/9/22	11.89
	Folly Beach 2823	Hugo	1989/9/22	5.58
	Folly Beach 2883B	Hugo	1989/9/22	4.19
	Garden City 4930	Hugo	1989/9/22	17.58
	Santa Rosa Island	Opal	1995/10/4	55.7
	Santa Rosa Island	Georges	1998/9/24	57.13
	Assateague Island, GPS1	Northeaster	1998/1-2	50.1
	Assateague Island, GPS3	Northeaster	1998/1-2	101.4
	Assateague Island, GPS4	Northeaster	1998/1-2	91.5
検証	North Myrtle Beach 5715	Hugo	1989/9/22	6.6
	North Myrtle Beach 5820	Hugo	1989/9/22	8.9
	North Myrtle Beach 5825	Hugo	1989/9/22	4.2
	North Myrtle Beach 5830	Hugo	1989/9/22	8.85
	North Myrtle Beach 5775	Hugo	1989/9/22	4.0
	North Myrtle Beach 5785	Hugo	1989/9/22	15.5
	Assateague Island 2330	Northeaster	1998/1-2	36.4
	Assateague Island 4850	Northeaster	1998/1-2	58.5
	Assateague Island 3720	Northeaster	1998/1-2	45.1
	横須賀海岸 P1	-	2006/10/7	15.65
	横須賀海岸 P2	-	2006/10/7	54.39
	横須賀海岸 P3	-	2006/10/7	34.65
	横須賀海岸 P4	-	2006/10/7	18.73
	横須賀海岸 P5	-	2006/10/7	11.40

以上に述べたイベントでの観測地として合計24の現地データを収集した。表-1に示すとおり、このうち、10ケースをキャリブレーションに使用し、残りの14ケースを検証に使用した。

3. 結果

(1) 堆積土砂量の定式化

既存の研究を参考に、越波流量が波の最大遡上高さRと砂丘最頂部高さH_c (図-9参照) との差の二乗に比例すると仮定し、さらに越波の継続時間、砂丘高さに依存した底質供給の多寡を考慮し、次式のような堆積土砂量Qの算定式(単位幅あたり)を想定した。

$$Q = a \frac{H_c t_D}{R T} (R - H_c)^2 \quad (\text{m}^3/\text{m}) \quad (1)$$

ここで、a: 比例定数、t_D: R > H_c となる時間の長さ、T: 波の周期である。ここで、波の遡上高さRについては、Hunt (1959) による次式を使用した。

$$R = 0.158 \sqrt{H_{0rms} L_0} \quad (2)$$

ここで、H_{0rms}: 沖波の二乗平均平方根波高、L₀: 沖波波長である。式(1)右辺には底質粒径・密度などの効果も含まれるべきと考えられるが、ここでは簡略な式形を想定した。式(1)右辺の定数aを求めるために、実測された堆積土砂量Qと、式(1)右辺の

$$\frac{H_c t_D}{R T} (R - H_c)^2 \quad (3)$$

との関係をプロットした(図-10)。これより、a=0.0011を得る。

さて、これまでに提案している同様な算定式にはWilliams (1978), Tanaka ら (2002) によるものなどがある

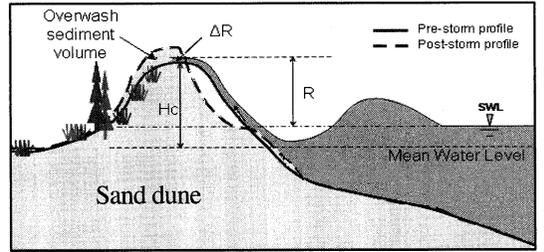


図-9 越波に関する物理量の定義

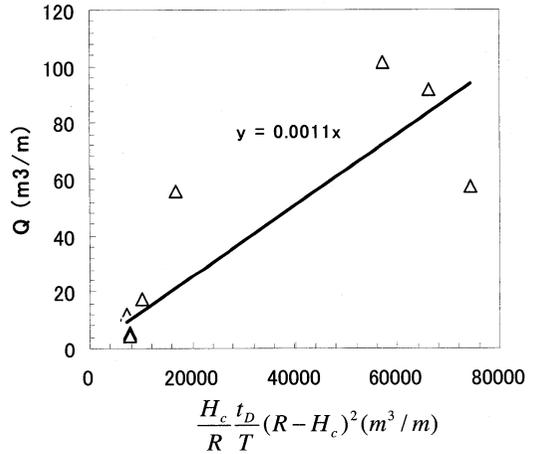


図-10 キャリブレーション結果

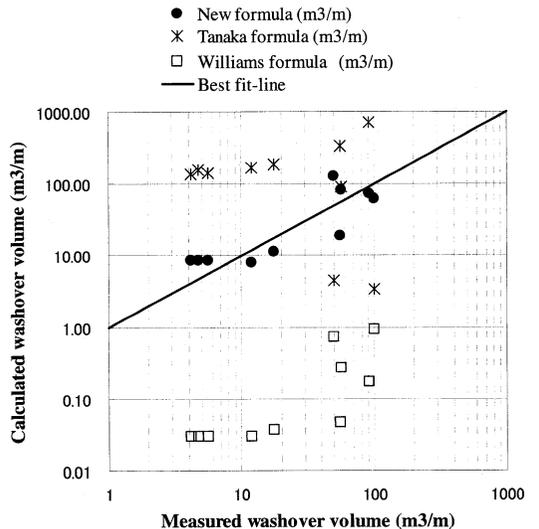


図-11 実測結果と算定値との比較

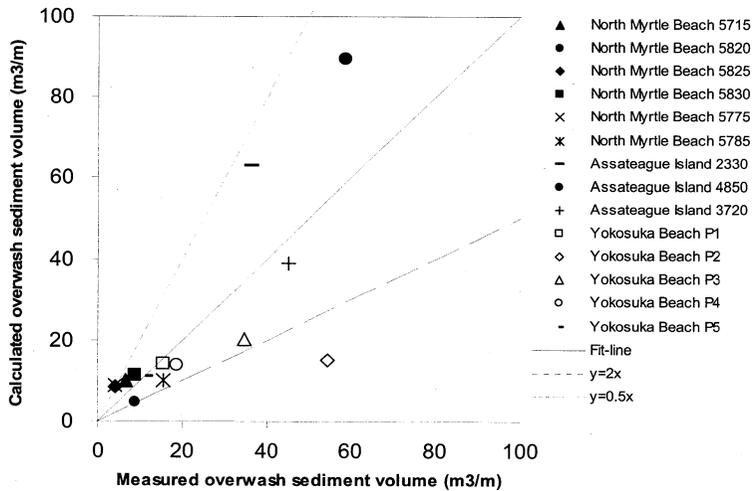


図-12 土砂堆積量算定式の検証結果

る。そこで、これら二式および新たに提案された式(1)による算定値と、実測値との比較を行い、図-11に結果を示した。これによれば、Williams (1978) の算定式は過小であり、逆に、Tanaka ら (2002) の式は過大な評価になっている。

(2) 堆積土砂量算定式の精度

次に、表-1 に示した検証データと式(1)との比較を行った。その結果を図-12に示す。検証データには、先のキャリブレーションと異なるデータセットを用いている。図は対数目盛ではなく、通常目盛に対して描かれたものであり、両者は良好な一致を示していると言える。図に示した鎖線は、式(1)から得られる値の2倍および0.5倍の値を表しており、プロットされたデータはほぼこの範囲に含まれている。

4. おわりに

(1) 暴浪時の越波により顕著な土砂堆積が生じた現地データとして、米国と宮城県横須賀海岸における資料を収集した。これをもとに、既存の越波流量式を応用し、土砂堆積量の定式化および検証を行った。

(2) 得られた算定式はばらつきが小さく、高い精度を有している。同式を用いることにより、海面上昇を加味した越波による堆積土砂量を算定することが可能である。

謝辞：本研究を実施するに当たり、P.L.William 氏、W.C.Eiser 氏、USGS・A.Sallenger 博士より貴重な現地データを提供いただいた。さらに、国土交通省北上川下流河川事務所、宮城県石巻土木事務所より貴重な資料の提供を受けた。また、本研究に対して日本学術振興会・科学

研究費 (No.17254002) の補助を受けた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- Nguyen Xuan Tinh・田中 仁 (2007)：越波による海浜変形の現地観測と数値計算, 海岸工学論文集, 第54巻, pp.681-685.
- Donnelly C.; Kraus, N.C., and Larson, M. (2004) : Coastal overwash, Part 1: Overwash of Processes. Regional Sediment Management Demonstration Program Technical Note, ERDC/RSM-TN-14, U.S. Army Engineer Researcher and Development Center, Vicksburg, MS.
- Donnelly, C., N.C. Kraus and M. Larson (2006): State of knowledge on measurement and modelling of coastal overwash, Journal of Coastal Research, Vol. 22, pp. 965-991.
- Eiser, W.C., and Birkemeier, M. (1991) : Beach profile response to Hurricane Hugo, Proceedings Coastal Sediments' 91, ASCE, pp.1681-1696
- Hunt, I.A. (1959) : Design of seawalls and breakwaters, Journal of the Waterways and Harbors Division, Vol.85, No.WW3, pp.123-152.
- Larson, M., Wise, R.A., and Kraus, N.C. (2004) : Coastal Overwash. Part 2: Upgrade to SBEACH, Regional Sediment Management Demonstration Technical Note, ERDC/RSM-TN-15, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS.
- Stone, G.W., Liu, B., Pepper, D.A., and Wang, P. (2004) : Importance of extratropical and tropical cyclones on the short-term evolution of barrier islands along the northern Gulf of Mexico, USA, International Journal of Marine Geology, Geochemistry and Geophysics, pp.63-78
- Tanaka, H., Nagasawa, T. and Suntoyo (2002) : Sediment intrusion into Gamo Lagoon by wave overtopping, Proceedings of 28th International Conference on Coastal Engineering, pp.823-835.
- Titus, J.G. (1998) : Rising Seas, Maryland Law Review, U.S. Environmental Protection Agency, Vol.57, pp.1279-1399.
- Williams, P.L. (1978) : Laboratory development of a predictive relationship for washover volume on barrier island coastlines, Master Thesis, Department of Civil Engineering, University of Delaware, Newark, 154 p.