

大規模潜堤背後の海浜地形の特徴と地盤沈下による断面変化

Characteristics of the Topography Change behind Large-scale Submerged Breakwater and Cross-shore Profile Change by Land Subsidence

吉田秀樹¹・清水利浩²・伊部知徳³・山田貴裕⁴・片野明良⁵

Hideki YOSHIDA, Toshihiro SHIMIZU, Tomonori IBE, Takahiro YAMADA and Akiyoshi KATANO

In Niigata west coast, integrated shore protection system by large-scale submerged breakwater has been applied. The topography change in the site is characterized by the belt-shaped scour extends along the submerged breakwater and land subsidence. This study intends to the above two typical process. By analyzing sounding survey data behind the submerged breakwater, it is confirmed that the scour depth of the belt-shaped scour relates to the speed of the submerged breakwater extension. Also, by analyzing the cross-shore profile, it is found that the cross-shore profile change which includes the effect of the land subsidence is quite similar to that by sea level rise predicted using Bruun's law.

1. はじめに

天端が海面下に没した潜堤は、景観、環境、利用に関する多くの利点を有するため、施工例が徐々に増えている。南ら(2001)のアンケート調査によると、潜堤の施工事例は、人工リーフも含め2000年の時点で既に約100件に及ぶ。ただし、潜堤は、離岸堤に比べて波の伝達率が大きいので、背後地形の安定性を確保することが重要になるが、それについては必ずしも確立された方法があるわけではない。これに関して、これまでに水理模型実験、数値シミュレーションを用いた潜堤背後地形に関する研究事例が報告されているものの、長期現地データに基づいた検討については不足している。

一方、IPCC第4次報告書統合報告書(2007)(以降、IPCC第4次報告)によると、地球温暖化の影響で今後100年に平均海面が18~59cm上昇することが報告されている。これに対し、三村ら(1994)の試算によると、30cmの海面上昇で全国の約57%の砂浜が失われることになっており、このため、地球温暖化が海浜地形に及ぼす影響を回避・低減するための適応策の検討が望まれている。

本研究は、まず、潜堤を含む面的防護方式による海岸保全が1988年に着工された新潟西海岸の長期現地データに基づき、潜堤背後の海浜地形の特徴と安定性を明らかにする。加えて、新潟西海岸で未だに継続している地盤沈下と海浜地形の関係を把握することで、地球温暖化による海面上昇が海浜に及ぼす影響を理解できるかどうかを検討することにした。というのは、地盤沈下は相対的

に海面上昇と見做せることができるということと、本研究の解析対象期間(1998~2007年)に約15cmの地盤沈下が生じており(この量は今後100年間に生じる海面上昇の25~83%に相当)、その影響が既に海浜地形変化に現れている可能性があると考えたからである。

2. 面的防護方式の施工履歴

図-1は、2007年度時点の潜堤、突堤等の平面配置と養浜により形成された海浜形状であり、それぞれの施工および養浜履歴を図-2に示す。

潜堤の施工延長は、第1期、第2期合わせて約1,400mに達し、突堤については、3基が概成し第2突堤先端には、潜堤に接続する潜突堤が1996年に施工されている。潜堤、突堤の施工が優先された第1区画の養浜は、1994年に始まり2002年までに約40万m³の砂が投入された。第1区画以外の区域も含めた総養浜量は約70万m³以上である。また、第1区画では、養浜砂を投入し始めた、1994~1995年に既設離岸堤の一部が撤去され、現在は海水浴場として市民に開放されている。

3. 潜堤背後地形の変化特性

(1) 潜堤背後地形の形成過程

潜堤背後に形成された地形の特徴は、図-1に示す水深10m以深の帯状の窪み地形が形成されていることである。高野ら(2004)は、この帯状の窪み地形(以下、洗掘溝)の形成については、潜堤延伸過程に潜堤端部で洗掘が生じ、この洗掘が残存するためであると説明している。

そこで、その後のデータも加えて、潜堤端部洗掘の位置と潜堤、突堤の施工状況との関係について再度調べた。

図-3は、潜堤直背後の地形変化の沿岸分布を縦軸方向に経年的に示したものである。図-3(a)は、測量年毎の変化量であり、図-3(b)は、潜堤施工前である1989年の海底地形を基準とした変化量である。図中の実線は、潜

1 正会員	新潟港湾・空港整備事務所所長
2	新潟港湾・空港整備事務所海岸係長
3	(財)沿岸技術研究センター主任研究員
4 正会員	(株)エコー調査・解析部主任
5 正会員	(株)エコー調査・解析部副部長

堤と突堤の施工履歴を示している。

測量毎の変化(図-3(a))を見ると、実線で示した潜堤の延伸に伴い、1m以上の洗掘域が沿岸方向に移動していることが分かる。1989年を基準とした海底地形変化量(図-3(b))には、潜堤延伸過程に洗掘が残存したことで、1m以上の侵食が潜堤直背後全域に分布している状況が認められる。累積洗掘量3m以上の大きな侵食が生じている場所は、第2突堤西側(沿岸方向距離1,000m付近)、第1突堤(同1,550m付近)と第1期潜堤東側端部(同1,730m付近)に分布している。

栗山ら(2007)は、第1突堤、第2突堤周辺の洗掘が第3突堤周辺に比べて深くなった要因を、以下のように述べている。

①第1期潜堤と第2期潜堤間の開口部から沖向きの流れが生じ、第3突堤先端を通過して西の潜堤端部に向かう流れが弱くなったために第3突堤先端の洗掘深が小さくなったこと、更に②潜堤端部と第1、第2突堤先端が近くに位置した時に、潜堤端部の乱れと突堤先端の乱れが重合することで洗掘が発達したのに対して、第3突堤周辺では、潜堤端部と突堤先端が近づくことが無かったため、洗掘が小さくなったと述べている。

これに対し、潜堤端部の洗掘について詳細に調べると、測量年毎の洗掘量には、年間2m以上の侵食がない。このことから、累積洗掘量3m以上の洗掘が生じた3つの場所は、複数年の洗掘が累積した結果である。ここに着目して、図-3をみると、潜堤端部の施工速度が遅い、もしくは計画延長に達していることがわかる。一方、累積洗掘量2m未満となる場所の潜堤は、ほぼ一定の延長が毎年施工されている。よって、潜堤の延伸過程に生じた年間2m以下の洗掘量は、洗掘の進行過程にあるため、潜堤の施工速度が遅くなれば、洗掘が更に進むことを意味しており、潜堤施工速度の違いが第1、第2突堤周辺と第3突堤周辺の洗掘量の差に現れたと考えられる。

(2) 潜堤背後地形形成後の安定性

次に、第1区画について潜堤端部で生じた洗掘のその後の安定性を特定領域内の平均水深の変化に注目して調べた。

図-4は、平均水深の計算対象領域を潜堤直背後と洗掘溝(具体的な場所は図中の凡例参照)としたときの、平均水深の経年変化図である。平均水深は、何れの領域においても、1990~1994年の間に急速に1~2m深くなっている。この時期は、潜堤の施工が開始され、潜堤が沿岸方向に延び、その先端部が第1、第2突堤を通過するまでの期間に相当する。

潜堤と突堤が概成した1994~2002年の平均水深は、潜堤直背後が緩やかに浅くなるのに対し、洗掘溝は変動を繰り返しつつ安定している。この間に潜突堤が施工され

ているものの、その効果は見受けられない。

試験養浜が実施された2002年以降の洗掘溝の平均水深は、養浜によって平均水深が浅くなるものの、やがて養浜以前の水深10mまで深くなる。ただし、潜堤の施工過程の洗掘速度に比べて遅い。潜堤直背後の平均水深については、投入した砂の移流の影響も含むものの、1994~2002年と同様に浅くなる傾向がある。

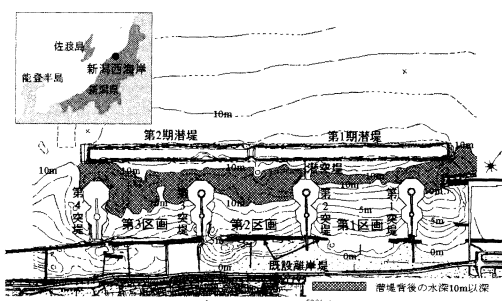


図-1 新潟西海岸の位置図と施設名称

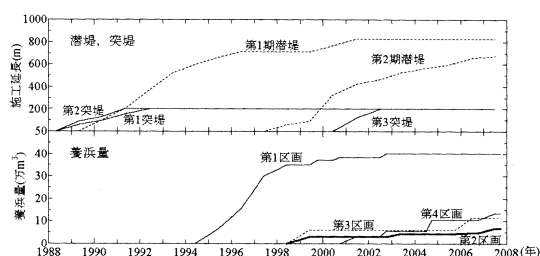


図-2 潜堤・突堤の建設履歴と養浜砂の投入履歴

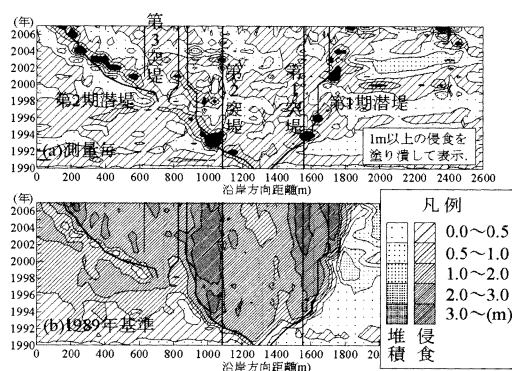


図-3 潜堤背後の断面変化量の経年変化図

4. 養浜地形の安定性

次に、洗掘溝よりも更に岸側の範囲について、養浜後の地形の安定性について調べた。

(1) 平面的な地形変化特性

新潟西海岸には、2005~2007年に高波浪が来襲した。

まず2005年12月22日には、既往最大波高8.48mを記録した。さらに、2007年1月7日に同第2位の8.28mの波が来襲した。

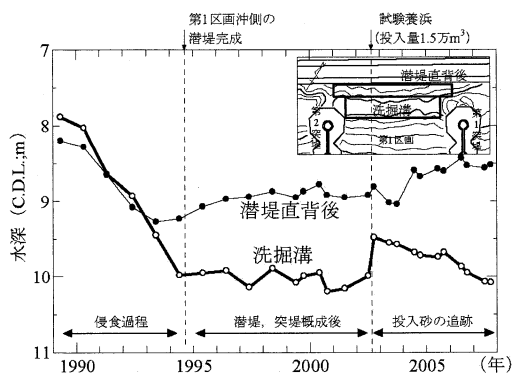


図-4 潜堤背後の平均水深の経年変化図

図-5(a)は、既往最大波高8.48mの波浪の発生を含む期間の地形変化であり、同(b)は同第2位の波浪の発生を含む期間の地形変化である。

2005～2006年の間には、汀線付近で0.5m以上の侵食が生じ、その沖側の水深2～4mに同程度の堆積が生じている。2006～2007年にかけて生じた地形変化は、前年に堆積が生じた水深帯で、同程度の侵食が生じている。潜堤背後の養浜地形は、高波浪来襲時に汀線が後退し、その後の静穏期に回復しない砂の非可逆的な沖方向への移動が生じている。

また、水深5m以深においては、波高8mを超過する高波浪が来襲しても、変化量0.3mを越える地形変化が生じていないことから、ほぼ安定していることがわかった。

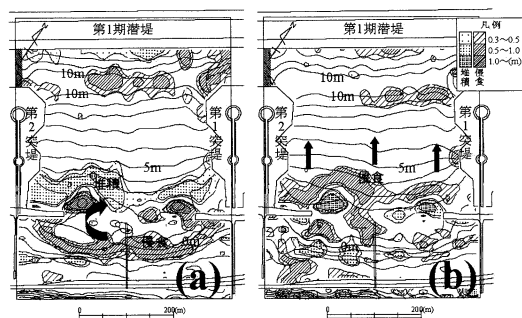


図-5 地形変化平面分布図((a)2005～2006年, (b)2006～2007年)

(2) 断面地形の形状と変化特性

砂の非可逆的な沖向き移動により形成される断面形状と変化特性を調べるため、岸沖方向の断面重ね合わせ図を図-6に示す。解析対象期間は、現地実験を除く、主要

な養浜を終えた2001年以降とし、図-6には代表的な断面を示した。

図-6に示した断面形状およびその変化の特性としては、汀線を含む水深-3～2mの範囲に限って大きく侵食していること、水深2mに平坦な地形が形成されていること、水深2～8mにかけて凸状の断面形状が形成していることである。

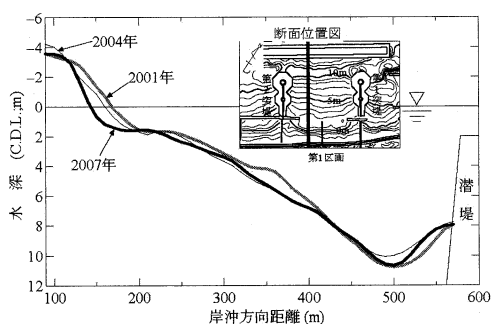


図-6 断面地形の重ね合わせ図

著しい侵食が起きている汀線変化速度を図-7に示す。対象期間は2001年以降、解析対象範囲は、第1突堤と第2突堤の間で既設離岸堤の影響の少ない沿岸方向距離210m間とし、その範囲にある10m間隔の22測線を対象に汀線変化量の平均値と標準偏差、更に汀線変化量の平均値を直線により近似し汀線の変化速度を求めた。

夏期、秋期の年2回の汀線変化量の標準偏差は小さく、平均的な汀線変化はほぼ一様であり、直線近似による汀線変化速度は、-3.26m/年であることがわかる。

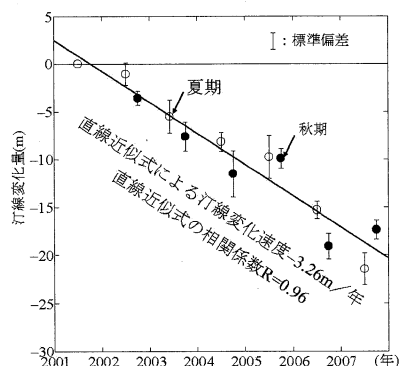


図-7 汀線変化量の経年変化図

(3) 土砂流出量の算定

次に、第1区画の土砂流出量について、侵食の激しい汀線付近の侵食量に着目して調べた結果について述べる。

まず、土砂流出量を算定する前に、冬季風浪の激しい日本海沿岸に位置するため、流出する土砂に飛砂による損失も含まれる可能性があった。そこで、田中ら(2007)と同様に河村式を用いて飛砂量を算定したところ、その量は少なく、また面的に複列配置した飛砂防止フェンスの効果もあり、第1区画の土砂流出量に寄与しないことが明らかになった。

次に、深浅測量成果から算定する土砂変化量には、新潟県で継続する地盤沈下の影響が含まれる。このため、地盤沈下量(図-8参照)に第1区画の面積を乗じて、それぞれの地盤沈下相当量を算定し、土砂変化量から地盤沈下相当量を差し引くことで、正味の土砂流出量を算定した。深浅測量成果から算定した土砂損失量は、 $1.03 \text{ 万 m}^3/\text{年}$ であり、これから地盤沈下相当量を差し引くと土砂流出量は $0.75 \text{ 万 m}^3/\text{年}$ となった。同様の方法で、汀線付近の土砂流出量を算定すると $0.51 \text{ 万 m}^3/\text{年}$ であり、第1区画から流出した土砂の約68%が汀線付近の土砂であることがわかった。

5. 地盤沈下に応答する断面変化

図-6に見られるように、対象海岸では汀線付近の水深-3~2mの範囲で集中的な侵食が生じている。しかもここからの土砂の流出量は、第1区画からの土砂流出量の68%になるほど多い。この鉛直方向に限られた範囲の侵食の原因を明らかにすることが、面的防護の砂浜の安定性を確保するために重要である。ここでは、新潟西海岸の地盤沈下との関係で考察を試みた。

(1) 新潟県の地盤沈下

新潟県の地盤沈下は、昭和50年代以降、沈静化しつつあるものの、海岸部では現在も $1 \text{ cm}/\text{年}$ で沈下している。この地盤沈下を監視するため、北陸地方整備局を含む関係6機関が連携して、1960年頃から広域水準測量が実施され、測量は岩室仮不動点を含む調査面積 606 km^2 に亘る範囲で年1回実施されている。ここでは、新潟西海岸に近い地点で、新潟港湾・空港整備事務所が実施する地盤沈下に関する資料を収集し、現状の地盤沈下を把握した。

図-8は、新潟西海岸の近隣で実施される地盤沈下の経年変化図であり、図中の折れ線が1997年基準、棒グラフが測量毎の地盤沈下を示す。

この間の地盤沈下量は、変動を繰り返しつつ、約 $1.52 \text{ cm}/\text{年}$ の速度で沈下している。

新潟西海岸の地盤沈下はIPCC第4次報告による海面上昇速度の3~8倍で継続している。地盤沈下は相対的な海面上昇と考えられるので、縦断地形変化に海面上昇による応答特性が現れていると考えた。そこで、次に海面上昇に対する海浜縦断地形の応答の特徴について述べる。

(2) 地盤沈下(海面上昇)に応答する断面変化

地盤沈下は相対的に海面上昇と見做せるので、地盤沈下に対する海浜縦断地形の応答は、海面上昇に対するそれと同じであると考えられる。海面上昇による汀線後退を説明するモデルに、平衡断面に関するBruun則(1962)に基づくものがある。つまり、沿岸漂砂がないと仮定すると、図-9において、「初期の海岸線の位置(A)が、海面上昇が起きると、そのままの地形ならばBまで海岸線が後退するだけだが、海岸線がAにあった平衡海浜断面になるように、前浜の土砂が沖に運ばれて、平衡地形となるCまで海岸線が後退する。」というものである。このモデルにおいては、これまで汀線の後退に特に注意が払われていたのだが、図-9をみると断面変化に以下のような特徴があることが分かる。

① 新たな平衡地形に変化する過程で前浜付近の浅い部分が集中的に侵食される。

② 前浜から流出した土砂は、移動限界水深(closure depth)までの領域で収支するため、外浜領域には逆に砂が堆積し、その結果、凸状の断面地形が形成される。

三村らは、新潟海岸の地盤沈下の影響を含む断面データを用いて検証し、このモデルは妥当であるとの結論を得ている。ただし、このモデルの前提となっている沿岸漂砂量がゼロの条件が新潟海岸に当てはまるかどうかの検討は行っておらず、また着目したのは汀線の後退量だけであり、①②のような断面変化までは検討していない。

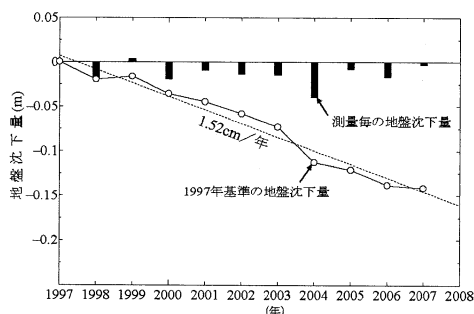


図-8 地盤沈下の経年変化図

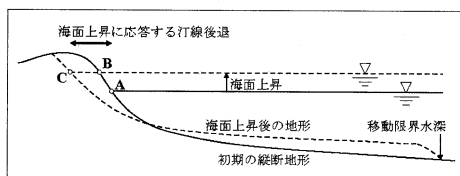


図-9 海面上昇に対する海浜縦断地形の応答

さて、第1区画の断面変化をBruun則に基づくモデルと対比しながら見てみることにする。まず、モデル適用の前提である沿岸漂砂量がゼロの条件は、第1区画が水

深200mまで延びる突堤で囲まれていることと、海底地形が2次元である(図-1参照)ことから、ほぼ満たされていると判断できる。そこで、断面変化を示した図-6をみると、既に指摘したように汀線付近に限って侵食を受けているという実態がある。この侵食は、上記①の特徴とよく対応している。さらに、水深2~8mの範囲の断面形状が凸状になっていることは、上記②の特徴と一致する。実は、図-10に示した第2区画の断面変化にも同じような特徴が現れている。第2区画は、現時点で沖の潜堤と既設離岸堤で二重に守られている。このような場所でも汀線付近の集中的な侵食が生じていることは、この侵食が潜堤の海浜安定化機能とは関係ない要因で生じていることを意味する。

第1区画の断面変化の以上の3つの特徴については、定性的ではあるが、Bruun則に基づくモデルで概ね説明できそうである。そうすると、現在の汀線付近の集中的な侵食と汀線後退の原因が地盤沈下である可能性が高くなる。ただし、もう一つの断面変化の特徴、すなわち、水深2m付近の海底がフラットになること(図-6)は、このモデルで説明できない。この部分には既設離岸堤のブロックが海底面下に残されている可能性があることや、沖の潜堤の天端レベルとほぼ同じであるといった、いろいろな要素がある。まだ分かっていないことが残されている、汀線付近の集中的な侵食の原因についての結論を出すためには、さらに調査が必要である。

汀線付近で生じている侵食の解明は面的防護方式で整備してきた新潟西海岸の安定について重要であることは勿論であるが、海面上昇による海岸侵食に対する対策を検討するためにも極めて重要である。というのは、新潟西海岸の地盤沈下はIPCC第4次報告による海面上昇速度の3~8倍で進行しているので、100年後に生じるであろう侵食が、ここでは早ければ10数年で現れるからである。

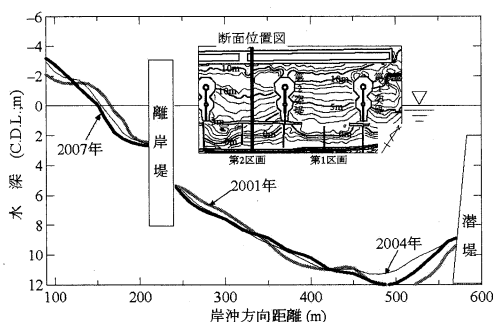


図-10 第2区画の断面地形の重ね合わせ図

6. 結論

新潟西海岸の長期現地データに基づいた潜堤背後の海

浜地形の特徴と安定性、更に新潟西海岸をモデルに、地球温暖化が海浜地形に及ぼす影響について検討した結果を以下に示す。

- ① 潜堤を施工すると潜堤端部で局所的な洗掘が生じる。この洗掘深は潜堤の施工速度に関係しており、潜堤の施工速度が遅くなると、洗掘深が増大する。第1、第2突堤周辺と第3突堤周辺の洗掘深が、大きくなった要因は潜堤の施工が停滞した場所、および現在の端部となっている場所である。
- ② 現地実験の結果、潜堤背後に形成される洗掘溝は、砂の投入後に元の水深に戻ることからほぼ平衡状態にあり、洗掘溝は概ねC.D.L.10m程度の水深となる。
- ③ 洗掘溝より岸側の水深5~10mの養浜地形は、波高8mを超える高波浪が来襲しても、顕著な地形変化は起こらず安定している。
- ④ 汀線付近の土砂の減少は、高波浪時に侵食し、静穏時に回復しない砂の非可逆的な冲向き移動で生じている。
- ⑤ 新潟西海岸の断面形状及びその変化特性は、水深3~2mの土砂が減少していること、水深2mに平坦な地形が形成されていること、更に水深2~8mにかけて凸状の断面形状が形成されていることである。
- ⑥ 新潟西海岸では地盤沈下が1.52cm/年の速度で継続している。地盤沈下は相対的な海面上昇と考えられるので、断面地形の応答を検討し、断面変化の特徴が、Bruun則に基づくモデルで概ね説明できる。
- ⑦ 断面形状及びその変化特性は、地盤沈下に応答する海浜縦断地形の変化も含まれる可能性があるため、地球温暖化に適応する海岸侵食対策を検討する上で、新潟西海岸の今後は、貴重な情報を与えることから、今後も注意深く監視を継続する必要がある。

参考文献

- 栗山善昭・山口里美・池上正春・伊藤 晃・高野誠紀・田中純彦・友田尚貴 (2007) : 新潟西海岸における潜堤周辺の地形変化特性, 港湾空港技術研究所報告, 第46巻, 第2号, pp.25-51.
- 高野誠紀・坂井秀雄・中宮正人・山田貴裕・黒木敬司・佐藤道郎 (2004) : 新潟西海岸での潜堤背後侵食についての数値解析, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 471-475.
- 田中純彦・蜂須賀和吉・土田吉昭・伊藤 晃・伊東啓勝 (2007) : 新潟西海岸での飛砂対策の有効性検討, 海岸工学論文集, 第54巻, pp. 546-550.
- 南 将人・真野 明 (2001) : 潜堤開口部周辺の地形変化に関する研究, 海岸工学論文集, 第48巻, pp.951-955.
- 三村信男・井上肇子・幾世橋真・泉谷尊司・信岡尚道 (1994) : 砂浜に対する海面上昇の影響評価(2), 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 1161-1165.
- Bruun, P (1962) : Sea-level rise as a cause of shore erosion, J.Waterways and Harbors Div, ASCE, 88 (WW1), pp. 117-130.
- IPCC 4th Assessment Report (2007) : Climate Change 2007, Synthesis Report, 104 p.