

[전문가 특별기고]

일본의 해안침식과 그 대책

Kuriyama Yoshiaki
 일본 항만공학기술연구소(PARI)
 특별연구원(해양·수공담당)
 (kuriyama@pari.go.jp)

1. 머리말

일본에서는 총연장 35,000km의 해안선에 대해서 약 4,500km의 모래해안이 있다. 1950년대 이후 댐 건설이나 해안·항만의 구조물의 건설에 의해 하천에서의 공급토사나 연안 표사량이 감소함에 따라 전국적으로 침식이 심각하게 되어, 현재 약 160ha의 모래해안이 매년 소실되고 있다(田中 등, 1993). 평균 모래해안의 폭을 50m로 가정하면 모래사장의 연간 소실량은 전체의 0.7%로 결코 적은 양은 아니다. 여기서는 해안침식의 메커니즘을 언급하면서 일본의 해안침식 대책공법을 소개하겠다.

2. 해안침식의 메커니즘

2.1 저질이동의 개요

수심이 50m보다도 깊은 곳에서는 파도의 영향이 해저면에 거의 도달하지 않는다. 따라서 해저면의 저질은 파랑만의 영향으로 이동하지는 않는다. 그러나 차츰 수심이 얕아지면 파랑의 영향이 해저면에 도달해 해저면의 저질이동이 시작된다.

처음에 저질은 해저면을 굴러가듯 해저면을 따라 이동한다. 수심이 얕아지면 해저면에 기복이 생겨 Ripple mark가 형성되고 저질은 Ripple mark 주변을 부유해서 이동한다.

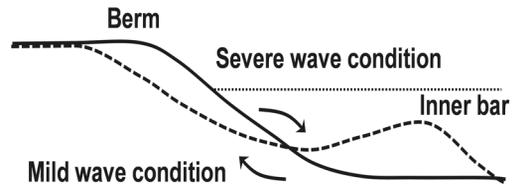
수심이 더욱 얕아지면 저면에 작용하는 파도의 힘이 커져 Ripple mark가 소멸되고 저질은 해저면 부근을 고농도의 상태로 이동한다. 이 이동 형태를 Sheet flow라고 부른다. 결국에는 쇄파가 발생하고

쇄파에 의한 혼탁 등에 의해 대량의 저질이 부유하여 흐름에 의해 운반된다.

바닷속 저질의 이동은 해안선과 평행한 연안방향의 이동과 그에 직각 방향의 단면방향으로 구분된다.

악천후시의 단기적 지형변화는 단면방향의 표사가 주요 원인이다. 악천후에서는 전빈의 저질이 외해로 옮겨져 최종 쇄파 위치 부근에서 Inner bar라고 불리는 얇은 여울이 형성된다(<그림 1>). 이렇게 형성된 Inner bar의 저질은 정온시에 서서히 연안쪽으로 돌아와 전빈이 악천후 전의 상태로 돌아온다(<그림 1>).

연안표사는 비스듬하게 들어오는 입사파와 연안류에 의해 발생하는 저질이동이고 해안침식이나 항내 매몰 등은 연안표사가 원인으로 발생하는 것이 많다. 아래에서는 연안표사에 의한 지형변화를 언급하겠다.



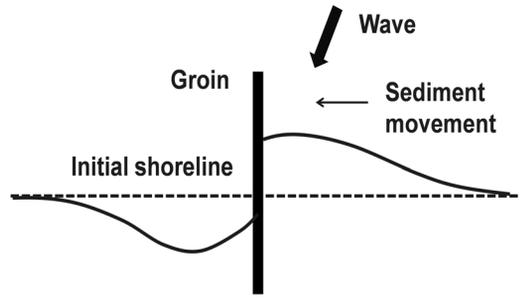
<그림 1> 악천후와 정온시의 단면변화의 모식도

2.2 연안표사에 의한 지형변화

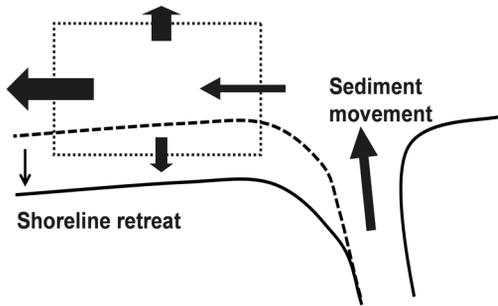
1) 하구주변의 지형변화

해안 토사는 주로 하천이나 해안언덕에서 공급된다. 그래서 모래의 공급량에 변화가 생기면 그에 따라 해빈이 변형한다. 예를 들어 이전에는 하천에서 공급된 토사량과 유출된 토사량이 균형을 이룬 해안의 하구 부근에 댐건설이나 하천으로부터의 모래나 자갈채취 등에 의해 하천에서의 공급토사량이 감소한 경우, 유출토사량이 유입토사량보다 많아지기 때문에 해안침식이 발생한다(<그림 2>). 시즈오카현(静岡県) 텐류강(天竜川) 하구에서는 유역 댐에서의 모래 퇴적이나 하천에서의 골재채취 등에 의해 40년간 최대 250m 정선이 후퇴했다(長島 등, 2005).

한편, 하천으로부터의 공급토사량이 증가하면 정선(汀線)은 전진한다. 니이가타현(新潟県) 테라도마리(寺泊) 해안에서는 1922년에 오코즈(大河津) 지류가 완성되어 그곳을 통해서 토사가 해안에 공급되어 하구를 중심으로 정선이 50년간 약 600m 전진(퇴적)했다. 오코즈 지류를 만들기 전에는 시나노강(信濃川)을 통해서 니이가타(新潟) 해안에 토사가 공급되고 있었는데 오코즈 지류가 완성된 이후 시나노강 토사량이 급격히 감소하였다. 이 토사량의 감소는 니이가타 해안 침식의 주요 요인 중 하나가 되었다.



〈그림 3〉 정선에 직각인 구조물(돌제)에 의한 지형 변화 모식도



〈그림 2〉 하구역의 지형변화 모식도

2) 구조물주변의 지형변화

연안표사의 불균형은 구조물에 의해서도 생긴다. 정선에 직각인 구조물(돌제나 도류제, 방파제)이 가 해빈에 건설되면 연안류에 의한 저질의 이동이 구조물에 의해 차단된다. 구조물에 대해 저질이 유입되는 쪽(표사의 상류쪽)에서는 유입토사량보다도 유출토사량이 적기 때문에 토사의 퇴적이 생긴다(〈그림 3〉). 한편, 구조물의 표사 하류 방향에서는 상류로부터의 토사 공급이 적어졌음에도 아래쪽에서의 저질 이동량은 구조물 건설 전후로 변화하지 않기 때문에 유입토사량보다도 유출토사량이 많아 침식이 발생한다. 이러한 지형변화는 정선의 방향이 파향과 직각이 되어 연안방향의 표사량이 0이 될 때까지 계속 진행된다.

3. 해안침식대책

해안침식대책은 크게 아래와 같이 3가지로 요약할 수 있다.

- (a) 해빈을 그대로 방치하고 필요에 따라 주민 등을 이주
- (b) 구조물로 해빈을 보존
- (c) 인공적으로 해빈에 모래를 투입(양빈)하여 해빈을 보존

이 가운데 (a)의 방법은 토지에 여유가 있는 국가에서는 채용되나 토지 이용율이 높은 국가(일본 등)나 지역에서는 그 실시하기 어렵다. 또 (c)의 방법(양빈)만으로도 양빈용 모래확보가 곤란하고 지속적인 유지관리비의 문제 때문에 일본에서는 사례가 적다. 따라서 일본에서 실제 채용된 해안침식대책은 (b)의 방법과 (c)를 조합한 방법이 대부분이다.

아래에서는 (b)의 방법으로 활용빈도가 큰 돌제, 이안제, 잠제를 소개하고, (c)의 방법의 기본인 모래해빈의 기능을 언급하겠다. 또한 (b)와 (c)를 조합한 방법으로 면적방호(面積防護)방식과, 침식 대책용 구조물을 설치하지 않으면서 해빈을 보존하는 일본의 최신공법인 투수충공법, (c)의 공법중 하나인 Sand bypass, Sand backpass를 소개하겠다.

3.1 돌제, 이안제, 잠제

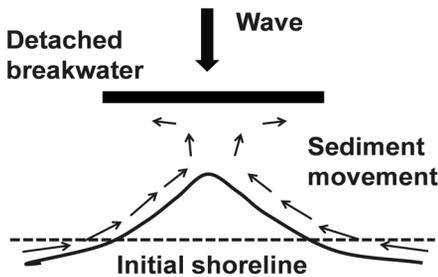
1) 돌제

돌제는 정선에 직각인 구조물로서 해안과 평행한

방향(연안방향)으로 쓸려가는 모래를 잡아둠으로서 모래해빈을 확보하는 구조물이다(〈그림 3〉). 그러나 돌제는 본래 하류방향으로 이동하는 모래를 차단하기 때문에 표사가 흘러오는 돌제의 상류쪽에서는 모래해빈이 유지되나 표사하류방향에서는 침식이 더욱 더 진행할 가능성이 있기 때문에 주의가 필요하다. 따라서 그 간격이나 길이는 하류쪽 지형에의 영향을 고려하면서 수치계산 등을 활용하여 신중하게 결정해야 한다.

2) 이안제

바닷속 모래는 해안에 평행한 연안방향뿐 아니라 직각방향으로도 이동하기 때문에 외해로 유출되는 모래를 무시할 수 없을 경우에 돌제는 효과적인 대책 공법이 될 수 없다. 이 경우는 이안제가 활용될 수 있다(〈그림 4〉). 이안제는 해안에 평행한 구조물로 모래해빈에 덮쳐오는 파도의 에너지를 감소시켜 외해로의 토사유출량을 줄일 뿐만 아니라 연안방향의 토사이동량도 줄일 수 있다.



〈그림 4〉 이안제배후의 지형변화의 모식도

이안제가 모래해빈 전면에 건설되면 그 배후(육측)에서 퇴적이 발생하고 퇴적영역 주변에서는 침식이 발생한다(〈그림 4〉). 구조물 배후에서는 정선부근에서 구조물 배후로 돌아들어가는 해빈순환류가 생기고 이 흐름에 편성하여 저질이 구조물 배후로 운반된다. 구조물 배후에서는 파도가 작기 때문에 저질이 부유하여 이동하지 못하고 구조물 배후에 퇴적된다.

3) 잠제

잠제(혹은 인공리프라고 함)는 구조물 상단이 해수면 아래에 위치하는 침수형 이안제이다. 잠제의 이 점은 천단이 해수면 아래에 있기에 반사율이 작고 경관을 해치지 않는다. 그리고 잠제는 큰 파도는 감쇄시키지만, 작은 파도는 통과시키기에 잠제 배후에서의 해수교환이 활발히 발생한다.

잠제의 반사율은 천단 높이나 폭에 따라 다르지만, 모형실험에 의하면 천단 수심이 1.5m정도의 경우 잠제 반사율은 0.15~0.25이다(白石 등, 2002). 이 반사율은 해수면 위로 노출된 블록의 반사율(0.3~0.5; 合田, 1990)보다 작고 모래해빈의 반사율(0.05~0.2; 合田, 1990) 정도이다. 반사율이 작으면 구조물 외측의 지형변화를 억제시키는데 유리해진다.

그러나 잠제의 단점은 천단이 수중에 있기 때문에 파랑감쇄효과가 이안제에 비해서 작다. 그래서 이안제와 같은 파랑감쇄효과를 얻기 위해서는 잠제의 폭을 넓게 할 필요가 있다. 잠제배후에서 수위 상승에 의한 흐름발생도 잠제의 단점이다. 평균수위는 파도가 부서지면서 상승하여 정선부근에서는 외해파 파고의 10~17%정도 된다. 잠제 위에서 파도가 부서지면 잠제의 바로 뒤에서 수위가 상승한다(高山·池田, 1998). 잠제가 없는 곳에서는 이러한 수위상승이 일어나지 않기에 연안방향으로 수위의 구배가 생긴다. 이 수위구배는 연안방향의 흐름을 발생시킴으로써 잠제배후의 세굴의 한 원인이 된다.

3.2 모래해빈

모래해빈은 뛰어난 쇄파기능, 그것에 의한 월파 감소기능, 그리고 구조물의 세굴방지기능 등의 뛰어난 방호기능을 가지고 있어서 1999년 개정된 일본 해안법에서 해안보전시설로 취급되게 되었다.

모래해빈은 앞서 말한 방호기능 외에 해수보전기능이나 생태계보전기능, 그리고 사람들에게 휴식과 레저 공간을 제공하는 등 친수기능을 가지고 있어서 방호와 이용과 환경의 조화 있는 해안보전을 실현해

나가는데 대단히 뛰어난 강점을 가지고 있다. 그렇기에 일본에서는 해안보전시설의 기준인 ‘해안보전시설의 기술상의 기준해설·동해설’(海岸保全施設技術研究会(2004), 이하 ‘해안의 기준·해설’)을 통해서 해안보전에 있어서 모래해빈을 활용하기를 권장하고 있다.

모래해빈은 해안구조물과 달리 파도나 흐름의 영향을 받아 끊임없이 변형하기에 그 설계법은 당연히 다른 해안보전시설의 설계법과는 다르다. ‘해안의 기준·해설’은 모래해빈의 설계방침으로 “소정의 기능이 발휘되도록 모래해빈의 폭, 높이, 길이를 정하는 것으로 한다. 또 양빈을 행하는 경우에는 모래의 재질을 정해야 한다”라고 하고 있고, 요구 성능에 관해서는 “모래해빈은 소정의 기능이 발휘되도록 적절한 성능을 가지는 것으로 한다. 또 모래해빈은 수시간에서 수개월의 시간단위의 해빈변형 및 수 십년의 기간 동안의 해빈변형에 적절한 안정성을 가져야 한다”라고 하고 있다. 모래해빈의 구체적인 설계방법에 대해서는 土木学会海岸工学委員会(2000), Coastal Engineering Committee, Japan Society of Civil Engineers (2004), 栗山(2006) 등을 참조하기 바란다.

3.3 면적방호공법

면적방호공법(Integrated Shore Protection System)은 복수의 공법을 조합함으로써 해안을 방호하는 공법으로 기본적으로는 모래해빈을 중심으로 한 정비를 염두에 둔 것이다. 구조물을 배치한 인공해빈도 일종의 면적방호라고 볼 수 있다.

면적방호 정비방법은 1990년대에는 계단식 호안 정비가 주로 적용되었다. 계단식 호안은 시민이 쉽게 모래해빈에 접근할 수 있는 반면, 몇 가지 단점이 있다. 먼저 통상의 계단식 호안 정비에서는 종래의 호안위치보다 앞에 계단부가 많이 정비되었다. 그래서 계단식 호안을 건설하면서 모래해빈의 폭이 줄어들었다. 또한 계단부에 파도가 도달한 경우에는 계단부에 의해 <그림 1>에 보이는 단면방향의 모래해빈의 동적안정기구가 방해를 받고 계단부에 의한 반사파

에 의해 계단부 전면에서 오히려 파랑이 요란스럽게 되어 결과적으로 계단부의 해빈침식이 가속되는 경우도 있다. 또한 계단호안의 일부가 해수에 잠기게 되면 호안의 해수면 부근에 해초 등이 부착하여 미끄럽게 되어 이용객에게 위험요소가 되기도 한다. 따라서 계단호안을 정비함에 있어서 모래해빈의 폭은 충분히 주의를 해야 한다.

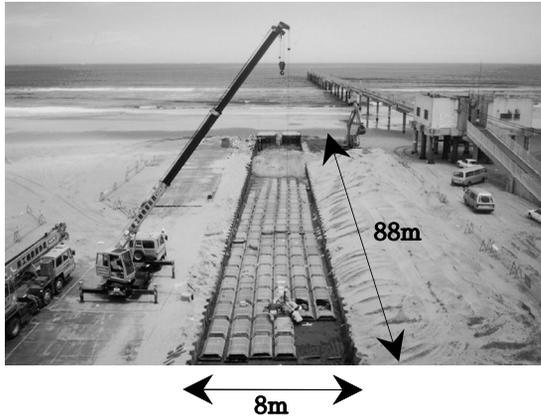
3.4 투수층공법

일본의 해안에서는 구조물을 이용하여 해빈을 보전하는 경우가 많은 한편, 구조물을 적게 하여 모래해빈을 재생하려는 시도도 행해지고 있다. 그 한 사례가 모래해빈의 지하수위를 낮춰서 모래의 축적은 쉽게 하고 유출은 어렵게 하는 특성을 이용한 공법이다.

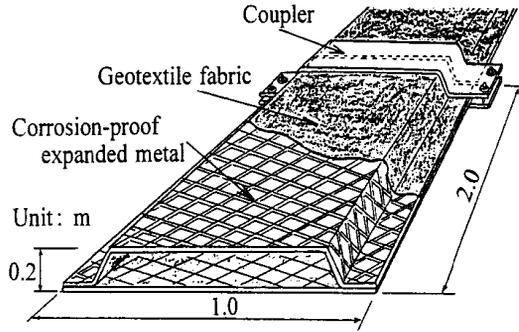
모래해빈에서 악천후 때 생기는 급격한 침식은 장주기파의 해빈 사면으로의 소상(遡上)과 그때 발생하는 모래해빈에서의 지하수위가 상승하여 모래입자가 가벼워져서 발생한다(加藤·柳嶋, 1992). 따라서 지하수위를 낮출 수만 있다면 해빈 사면을 소상하는 파도가 지하로 침투하면서 흐름이 모래해빈 아래 방향으로 형성된다. 이 흐름에 의해 모래해빈은 아래 방향으로 내려눌려져 침식이 어렵게 되고 해빈을 소상한 해수에 포함된 부유사가 전빈에 남기 때문에 모래해빈이 안정하게 된다.

지하수위를 낮추는 방법으로서 펌프를 이용한 방법과 모래해빈의 아래에 돌 등 투수성이 뛰어난 재료(투수층)를 매립하는 방법이 있다(柳嶋 등, 1995). 후자는 실내실험 후, 이바라키현(茨城県) 하사키해안(波崎海岸)에서 현지실험이 행해졌다(Katoh·Yanagishima, 1996; 柳嶋 등, 2003). 투수층의 설치범위는 해안 단면 방향으로는 악천후 때에 파도가 소상하는 끝자락에서 L.W.L.까지 길이 88m, 연안방향의 폭은 8m이다(<그림 5>). 투수층의 설치깊이는 6년간의 실측단면을 토대로 가장 깊이가 깊은 포락단면보다 아래쪽에 설치하며, 그 구배는 포락단면과 같은 구배인 1/30으로 하였다. 투수층은 <그림 6>과 같이 폭 1.0m, 두께 0.2m의 방식도장을 한 그물철망과 방

사시트를 조합한 Drain unit로 구성된다.



〈그림 5〉 이바라키현 하자키해안의 투수층 시공



〈그림 6〉 이바라키현 하자키해안의 투수층 (柳嶋 등(2003)에 의함)

투수층 설치 해빈과 미설치해빈의 지형변화를 비교하면 악천후시 투수층공법을 설치하지 않은 해빈은 많이 침식된 것에 비해서 투수층공법을 설치한 해빈은 침식양이 적어 악천후의 단기 침식에 대해 투수층이 효과가 있는 것이 확인되었다. 한편, 정온시에는 투수층 미설치 해빈에서는 악천후시에 침식된 전빈이 회복하는데 2~3주 걸렸는데 투수층 설치 해빈은 수일만에 전빈이 회복되어 정온시에도 투수층의 효과가 확인되었다(柳嶋 등, 2003).

투수층공법은 야마구키현(山口県) 히카리시(光市) 니지가하마(虹が浜) 해안, 에히메현(愛媛県) 마츠야

마항(松山港) 해안 등에 시공되어 있다. 니지가하마 해안의 투수층 제원은 단면방향으로 약 70m, 연안방향으로 120m, 두께 2m이고, 투수층은 하자키해안의 drain unit와 달리 망형상의 주머니에 담긴 5호 사석으로 구성되어 있다. 마츠야마항 해안에서는 단면방향 24m, 연안방향 24m의 범위에 양빈면보다 약 2m 아래쪽에 하자키해안과 같은 Drain unit가 설치되었다.

3.5 Sand bypass

구조물을 적게 하고 모래해빈을 재생하는 다른 방법으로는 미국이나 호주 등에서 시행되는 Sand bypass나 Sand backpass가 있다. 이것은 모래의 연안방향 이동이 도류제 등의 해안구조물 설치에 의해 방해받을 때 표사 상류쪽이 퇴적되고, 하류쪽이 침식되는 경우에 적합한 해안보전공법으로 해안구조물의 표사 상류쪽에 퇴적된 모래를 지속적으로 하류쪽으로 흘려보내거나(Sand bypass), 해안구조물보다 상류쪽 침식지역에 이동시키는 방법(Sand backpass)이다.

일본에서는 교토(京都)의 아마노하시다테(天橋立)에서 Sand bypass가 돗토리(鳥取)의 유미가하마(弓ヶ浜) 해안에서 Sand backpass가 한정적으로 실시되고 있다.

Sand bypass공법의 단점은 주기적인 양빈으로 인한 운영경비의 증대이다. 본 공법이 일본에서 잘 적용되지 않고 있는 이유 중 하나가 운영경비에 대한 이해를 얻기 힘든 것에 있었다. 그러던 가운데 1999년 해안법 개정이 있었고 이 개정된 해안법 안에는 해안정비시에 가능한 한 모래의 흐름을 차단하지 않도록 해야 한다는 내용이 들어있다. 이러한 해안정비 지침의 변화에 따라, 주기적 양빈에 따른 비용증대에도 불구하고, 모래 흐름의 연속성을 확보해주는 공법인 Sand bypass 등에 대한 관심이 높아지고 있다. 한편으로 Sand bypass 등을 검토함에 있어서도 유지양빈량을 적게 할 필요가 있고 그러기 위해서는 필요 최소한의 구조물을 건설하여 표사량을 적게 하는 방법을 검토할 필요도 있을 것이다.

3. 맺음말

해안침식은 일본 뿐 아니라 세계 각지에서 발생하고 있는 문제이다. 문제해결에 있어서는 먼저 현장 데이터를 토대로 한 해빈변형의 실태와 그 원인 파악과 함께 장래의 해빈변형을 예측하는 것이 필요하다. 대책이 필요하다고 판단되면 복수 후보의 대책공법에 대한 효과를 파악하여 최적의 대책공을 선택한다.

해안침식의 원인이 같다고 하더라도 여러 요인(해상조건, 양빈사나 석재 등의 가격, 양빈사의 조달 편의성, 연안어업의 상황, 희귀종의 존재, 모래해안의 이용도, 경관의 중요도 등)에 의해, 그 대책공법은 나라마다 혹은 지역마다 다를 수 있다. 따라서 해안침식대책은 획일적으로 책정하는 것이 아니라, 상기의 요인을 충분히 고려하여 지역의 특성에 맞는 효과적인 대책을 책정해야 한다.

지금까지 일본의 해안침식 현황과 그 대책에 대해서 소개하였다. 이러한 내용이 앞으로의 해안침식대책 검토에 조금이나마 도움이 되어 아름다운 모래해안을 유지하고 보전해 나가게 되길 기원하는 바이다.

번역 편집: 이재형 (jaehyeng_lee@hanmail.net)

감수: 강윤구 (yoonkoo.kang@samsung.com)

참고문헌

- 海岸保全施設技術研究会(2004). 海岸保全施設の技術上の基準・同解説. 日本港湾協会, 全国農地海岸保全協会, 全国漁港漁場協会, 全国海岸協会, 322.
- 加藤一正, 柳島慎一(1992). 長周期波によるバームの侵食. 土木学会論文集, No.452/II-20, 41-50.
- 栗山善昭(2006). 海岸変形, -実態, 予測, そして対策-. 技術堂, 157.
- 合田良実(1990). 増補改訂 港湾構造物の耐波設計 -波浪工学への序説-. 鹿島出版会, 32-84.
- 白石哲也, 土市進, 近川喜代志, 千葉明裕, 小森俊英(2002). 新潟西海岸潜堤形状検討実験について. 海洋開発論文集, 第18巻, 671-676.
- 高山郁夫, 岩崎伸昭, 宇多高明, 有村盾一(2005). 遠州灘海岸の天龍川河口以西の侵食実態. 海岸工学論文集, 第52巻, 596-600.
- 柳島慎一, 加藤一正, 天坂勇治, 名城整, 望月徳雄(1995). 現地海岸に埋設した透水層の排水量と前浜地形変化. 海岸工学論文集, 第42巻, 726-730.
- 柳島慎一, 佐藤勝弘, 原隆, 齋藤正文, 岩佐直人, 堀謙吾, 長谷川巖, 長谷川準三(2003). 透水層埋設による海浜安定化工法の開発. 港湾技術研究所報告書, 第42巻, 第1号, 1-113.
- Coastal Engineering Committee, Japan Society of Civil Engineers (2004). Design Manual for Coastal Facilities 2000. Japan Society of Civil Engineers, 577.
- Katoh, K. and Yanagishima, S. (1996). Field experiment on the effect of gravity drainage system on beach stabilization. Proc. 25th Inter. Conf. on Coastal Eng., ASCE, 2654-2665.