

## 구조적 안정성을 고려한 콘크리트 피복재의 신뢰성 설계 Reliability-based Design Method of Concrete Armour Units with Structural Stability

이 철 응\*  
Cheol-Eung Lee\*

**요 지** : 수리학적 안정성과 구조적 안정성을 동시에 만족시키면서 피복재의 중량을 산정할 수 있는 방법이 수립되었다. 수리학적 안정성은 Hudson의 경험식을 이용하여, 구조적 안정성은 충격하중 작용시 피복재 내부에 발생하는 최대인장응력을 산정, 피복재의 인장 저항력과 비교하는 개념으로 해석되었다. 이와 같이 산정된 수리학적 안정성과 구조적 안정성에 대한 적용한계를 재현기간별 설계 유의파고, 피복재의 중량, 그리고 인장 저항력의 함수로 제시하여 실무자들이 쉽게 사용할 수 있도록 하였다. 또한 결정론적 산정법의 불확실성을 고려하기 위하여 수리학적 안정성과 구조적 안정성에 대한 신뢰성 해석이 추가로 수행되었다. 두 파괴모드를 하나의 직렬계로 구성하여, 신뢰성설계법에서 이용되는 목표파괴확률을 가지고 단면파괴율의 함수로 피복재의 최적중량을 산정할 수 있었다.

**핵심용어** : 구조적 안정성, 최대인장응력, 목표파괴확률, 직렬계, 신뢰성설계법

**Abstract** : A method for the determination of concrete armor unit weights with hydraulic stability and structural stability may be formulated in this paper. The hydraulic stability is analyzed by using Hudson's formula, the structural stability is also studied by evaluation of maximum flexural tensile stresses in armor unit induced by the impact loads and by comparison of those with the tensile resistance strength directly. The applicable criteria for concrete armor units can be represented as a function of design wave heights with return period, armor weights, and tensile strengths for the practical uses. In addition, reliability analyses for two failure modes are carried out to take into account some uncertainties. Finally, a series system for two-failure mode analysis can be made up straightforwardly, by which the optimal weights of armor units can be estimated with the various relative breakages, given the specific target probability of failure under the concepts of reliability-based design method.

**Keywords** : structural stability, maximum flexural tensile stress, target probability of failure, series system, reliability-based design method

### 1. 서 론

경사제의 사면상에 거치된 피복재는 외해에서 내습되는 파랑에 의하여 외력을 받게 된다. 이와 같은 하중에 저항할 수 있는 피복재의 안정조건은 다음과 같이 두 가지로 구분할 수 있다. 하나는 파력에 의하여 유발되는 피복재의 움직임과 관련된 수리학적 안정성이고, 다른 하나는 피복재 내부에 유발되는 응력에 대한 단면 저항력의 관

계를 나타내는 구조적 안정성이다. 지금까지의 경험이나 자료에 의하면 피복재의 크기가 상대적으로 작은 영역에서는 수리학적 안정성이 피복재의 안정성을 지배하나, 피복재의 크기가 증가하게 되면 피복재의 안정성은 구조적 안정성에 의하여 지배되는 것으로 알려져 있다(CIAD, 1985). 최근 방파제의 설치위치가 점차 심해로 확장되면서 사용되는 피복재의 크기도 점점 커지고 있다. 그럼에도 불구하고 아직까지 경사제 피복재의 안정성 해석에서

\*강원대학교 토목공학과(Department of Civil Engineering, Kangwon National University, 192-1 Hyoja2-Dong, Chuncheon, Kangwon-do, Korea. celee@kangwon.ac.kr)

는 구조적 안정성을 무시한 채 단지 수리학적 안정성만을 고려하는 경향이 있다. 포르투갈의 Sines, 미국의 Crescent City, 남아프리카의 Richards Bay, 그리고 우리나라의 소흑산도항 방파제 등과 같은 대규모의 경사제 파괴가 유발되기도 하였다. 파괴원인으로는 구조적 불안정성을 동반한 수리학적 불안정성이 주류를 이루고 있다. 즉, 구조적 불안정성에 의하여 피복재의 일부가 단면파괴 되어 설계조건보다 작은 파랑에서도 저항할 수 없는 크기로 분할되면서 연속적인 수리학적 불안정성으로 이어지는 파괴 형태이다. 파괴된 피복재의 종류는 대부분이 Dolos나 TTP와 같이 맞물림 효과를 증대시키기 위하여 다가지를 가지면서 흘쭉한 형태로 제작된 인공 콘크리트 피복재이다. 따라서 이와 같은 경사제의 피복재에 대한 파괴 형태에 대한 연구가 진행되기도 하였다. 즉, 수리학적인 안정성은 물론 구조적 안정성을 동시에 만족할 수 있는 피복재의 증량산정에 대한 연구이다. 현재까지 수리학적 안정성에 대한 연구는 많은 연구자들에 의하여 활발하게 진행되었다. 그러나 구조적 안정성에 대한 연구는 이에 비하면 상대적으로 미약한 실정이다. 이는 구조적 안정성과 관련된 문제가 수리학적 안정성을 해석하는 문제보다 상대적으로 복잡한 데 비해, 해석할 수 있는 방법은 오히려 상당히 제한적이기 때문이다. 즉, 축척효과에 의하여 모형실험에 의한 해석 방법에 상당한 제약성이 내포되기 때문이다.

피복재의 구조적 안정성, 즉, 단면파괴에 대한 연구는 Burcharth(1981)에 의하여 체계적으로 수립되었다. 파랑 작용에 의하여 피복재 내부에 발생하는 인장응력이 피복재의 인장 저항력을 초과할 때 발생한다는 개념을 사용하였다. 따라서 Dolos 피복재 내부에 발생하는 인장응력을 산정하기 위하여 낙하실험 및 충격실험을 수행하였다. 비록 수리모형 실험에 의하여 직접적으로 입사파랑과 피복재 내부의 인장응력의 관계를 제시하지는 못하였지만, 모형실험에서 적용되어야 하는 상사성에 대한 연구와 해석 방법에 대한 근본적인 개념들이 제시되었다. Lin et al.(1986)도 동일한 방법으로 측면충돌 실험을 추가로 실시하여 삼차원적인 단면파괴에 대한 해석을 시도하였다. 그러나 이들도 피복재 내부에서 발생하는 인장강도의 크기를 낙하높이와 충격거리의 함수로 해석하였을 뿐 입사파랑과의 관계로 정의하지는 못하였다. Tedesco and McDougal(1985), McDougal et al.(1988)도 제한된 조건하에서 단순화된 파력산정 모형과 응력해석 수치모형을 이용하여 Dolos의 구조적 안정성을 해석한 바 있다. 한편 Baird et al.(1986), Nishigori et al.(1986), Scott et al.(1986), Howell

(1988), Zwamborn et al.(1988), Melby and Howell(1989) 등이 수리모형실험을 통하여 경사제 사면상에 거치된 피복재의 구조적 안정성을 해석한 바 있다. 이들은 주로 피복재 내부에 설치되거나 부착된 변형계(strain gauge)를 이용하여 입사파랑의 특성과 피복재 내부의 인장응력의 관계를 수립하려고 노력하였다. 피복재 내부의 인장응력은 주로 정적, 동적하중에 의하여 발생된다. 정적하중은 피복재의 자중과 관련하여 발생하는 하중이며, 동적하중은 주로 파랑 작용에 의하여 발생하는 하중이다. 동적하중은 또한 중복하중(pulsating load)과 충격하중(impact load)으로 구분된다. 여기서 충격하중은 파랑 작용에 의하여 발생하는 피복재의 흔들림이나 이동 및 구름(rocking/displacement/rolling)에 의하여 발생하는 하중이다. 즉, 수리학적 안정성에서 일반적으로 허락되는 범위의 흔들림이나 이동이 일정 크기 이상의 피복재에서는 구조적 안정성에 중요한 역할을 할 수도 있다. 예로 Nishigori et al.(1986)은 임의의 파랑조건에서 피복재의 흔들림에 의하여 피복재 내부에 발생하는 최대인장응력은 약 2.9 MPa이며, 이동이나 구름에 의하여는 약 9.0 MPa 정도의 크기로 발생된다는 결과를 제시하기도 하였다. 일반적으로 알려진 무근 콘크리트 피복재의 인장 저항력은 약 2-6 MPa로 알려져 있다(Franco et al., 2000). 따라서 충격하중 조건에서 피복재의 인장 저항력을 초과하는 인장응력이 파랑의 작용에 의하여 발생될 수 있음을 알 수 있다. 그러나 이상의 연구에서는 파랑 작용에 따른 피복재의 움직임과 그에 따른 피복재 내부의 발생 응력의 크기가 정성적으로 해석되었을 뿐, 응력을 정량적으로 예측할 수 있는 방법이나 관계식이 제시되지 못하였다. Burcharth et al.(1991)은 기존의 많은 연구 결과들과 자신들의 수리모형 실험 결과를 이용하여 피복재 내부의 인장응력에 대한 분포함수를 제시한 바 있다. 비록 중복하중에 대한 결과이지만 이들은 응력분포함수를 이용하여 수리적 안정성과 구조적 안정성을 동시에 만족하는 Dolos 피복재의 증량 산정 도표를 제시하기도 하였다. 또한 Anglin et al.(1990), Melby(1990, 1993), Zwamborn and Phelp(1990) 등이 Dolos 피복재 내부의 응력을 정량적으로 산정할 수 있는 방법을 제시하였다. 특히 Melby(1990, 1993)는 설계자들이 쉽게 사용할 수 있도록 피복재에 발생하는 최대인장응력을 파고 또는 피복재의 증량에 대한 함수로 제시하였다. 최근에 Burcharth et al.(2000)은 피복재의 단면파괴에 영향을 주는 여러 관련변수들을 분석하여 단면파괴율을 해석할 수 있는 경험식을 제시하였다. 이 경험식은

파고, 피복재의 중량 그리고 콘크리트 피복재의 인장 저항력의 함수로 정의되고 있다. 그러나 구조적 안전성과 관련된 문제의 복잡성이나 불확실성에 비추어 보면 경험식의 실제 적용성에 대한 연구는 현장 관측자료와의 비교를 통하여 더 검토되어야 한다. 한편 이철웅(2003)은 CIAD(1985)의 해석방법과 허용파손율의 개념을 도입하여 TTP 피복재의 구조적 안전성에 대한 신뢰성 해석을 수행한 바 있다. 피복재의 단면 파괴모드에 대한 수학적 접근방법을 수립하고, 관련 문제의 불확실성에 대한 영향정도를 해석하였다. 그러나 계산과정이 복잡하여 실무자들이 이용하기에는 여러 가지 어려움이 있다.

이상의 연구들은 대부분이 Dolos 피복재에 대한 것으로, 현재 우리나라에서 가장 많이 사용되는 TTP에 대한 연구는 몇몇 연구를 제외하고는 거의 없는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 Melby(1990, 1993), Burcharth et al.(1991)에 의하여 제시된 개념 및 결과들을 이용하여 수리학적 안정성과 구조적 안정성을 동시에 만족하는 TTP 피복재에 적용 가능한 중량산정 방법을 재현기간에 따른 설계 유의파고, 피복재의 중량 그리고 인장 저항력의 함수로 제시하였다. 또한 Hudson의 경험식과 Burcharth et al.(2000)의 TTP에 대한 경험식을 이용하여 수리학적 안정성과 구조적 안정성에 대한 신뢰성 해석을 수행하였다. 마지막으로 관련 변수들의 불확실성을 고려하면서 실무자들이 비교적 쉽게 사용할 수 있는 신뢰성설계법을 제시하였다.

## 2. 피복재 내부의 최대인장응력 산정

콘크리트 피복재의 구조적 안정성을 해석하기 위해서는 먼저 피복재의 내부에 발생하는 최대인장응력에 대한 산정이 올바르게 수행되어야 한다. Burcharth et al.(1991)은 수리모형실험으로부터 얻어진 자료를 이용하여 Dolos 피복재 내부에 발생하는 최대인장응력에 대한 해석을 자세히 수행하였다. 임의의 파랑 조건에서 인장응력에 가장 취약한 부분이라고 생각되는 피복재 단면의 응력을 측정하여 정적하중 상태와 동적 중복하중에 대한 응력 분포함수를 제시하였다. 이는 비쇄파조건에서는 경사제 전사면에 적용이 가능하지만, 쇄파조건에서는 평균해수면 아래 일정 거리 이하에 놓인 피복재에만 적용 가능한 방법이다. 따라서 모든 입사조건에 대해 적용하기 위해서는 충격하중에 대한 고려가 반드시 필요하다. 앞에서 언급되었듯이 무근 콘크리트의 인장 저항력을 초과하는 하중조건

은 대부분이 충격하중 조건에서 발생되기 때문이다. 한편 Melby(1990,1993)는 충격하중을 포함하는 조건에서 Dolos 피복재 내부에 발생하는 최대인장응력을 산정하여 피복재의 중량의 함수로 제시하였다. 따라서 본 연구에서는 Burcharth et al.(1991)의 분포함수와 해석방법을 이용하여 먼저 충격하중이 고려되지 않은 상태에서 피복재 내부의 최대인장응력을 산정하였다. 다음으로 이의 결과를 Melby(1990, 1993)의 결과를 비교하여 충격하중에 따른 영향을 고려할 수 있는 충격계수를 도입하였다. 마지막으로 Dolos 내부에서 발생하는 최대인장응력의 결과를 TTP 피복재로 확대할 수 있는 방법을 제시하였다.

먼저 Burcharth et al.(1991)은 수리모형실험을 통하여 중복하중이 작용할 때 Dolos 피복재 내부에서 발생하는 최대인장응력은 다음 식 (1)과 같은 정규분포의 함수를 따른다고 제시하였다.

$$f(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{y-\mu}{\sigma}\right]^2\right\} \quad (1)$$

여기서  $y=\ln(\sigma_p/\rho g H_D)$ ,  $\sigma_p$ 는 피복재 내부 취약단면에서 발생 가능한 최대인장응력,  $\rho$ 와  $g$ 는 각각 피복재의 밀도와 중력가속도 그리고  $H_D$ 는 피복재의 크기이다.

또한 최대인장응력에 대한 관측자료와 입사파고와의 관계를 이용하여 산정된 확률변수,  $y$ 에 대한 평균  $\mu$ 와 표준편차  $\sigma$ 는 다음 식 (2)와 같이 정의하였다.

$$\mu = 1.723 + 0.169(H_S^T/H_D) \quad (2a)$$

$$\sigma = 0.661 - 0.046(H_S^T/H_D) \quad (2b)$$

여기서  $H_S^T$ 는 재현기간 T년에 해당하는 경사제 전면의 유의파고이다. 따라서 식 (1)과 (2)를 이용하면 임의의 초과수준/확률에 해당하는 피복재 내부에서 발생하는 최대인장응력을 파고의 함수로 산정할 수 있다. 본 연구에서도 Burcharth et al.(1991)과 동일하게 피복재 내부에서 발생하는 무차원화된 최대인장응력의 크기를 피복재의 크기로 무차원화된 상대파고로 산정하여 Fig. 1에 제시하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 초과수준에 따라 각기 다른 결과를 나타내고 있다. 또한 상대파고에 따라 최대인장응력이 점진적으로 증가하는 사실을 확인할 수 있다. 그림에는 인장 저항력이 3.5 MPa인 콘크리트 피복재의 중량에 따른 적용 가능 범위도 수평 점선으로 함께 제시하였다. Dolos 피복재의 밀도는  $2300 \text{ kg/m}^3$ 이고, 두께비(waist ratio),  $y=0.32$ 를 이용하여 계산된 결과이다. 이때 피복재의 크기

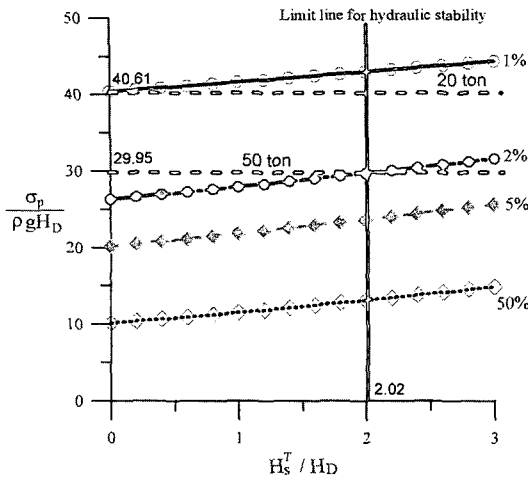


Fig. 1. Dimensionless stresses estimated by Eq. (1) and (2) according to the several exceedance levels.

는 Dolos의 두께비에 따른 부피를 규정하는 다음 식 (3)을 이용하여 산정하였다.

$$V = 0.675\gamma^{1.285}H_D^3 \quad (3)$$

한편 Fig. 1에는 수리학적 안정성을 만족하는 범위가 또한 연직선으로 함께 표시되어 있다. 즉, Hudson의 경험식을 이용하여 경사 1:1.5와  $K_D=16$ 을 가지고 산정된 결과이다. 즉, 중량이 주어졌기 때문에 Hudson의 공식을 이용하면 해당 중량에 적합한 파괴를 산정할 수 있다. 또한 식 (3)을 이용하면 각각의 중량에 대한 피복재의 크기도 쉽게 산정할 수 있다. 따라서 Fig. 1은 피복재의 수리학적 안정성과 구조적 안정성에 대한 해석이 모두 포함된 결과이다.

그러나 이상의 결과는 충격하중이 고려되지 않은 결과이다. 따라서 충격하중을 올바르게 고려할 수 있는 방법이 필요하다. 이는 앞 절에서 언급된 바와 같이 피복재 단면 파괴의 많은 부분이 충격하중에 의하여 발생되기 때문이다. Burcharth et al.(1991)은 비록 작용시간은 상대적으로 짧지만 충격하중에 의해 발생하는 최대인장응력은 중복하중에 의한 것 보다 약 1.4배 정도 크게 나타난다고 언급한 바 있다. Timco(1983), CIAD(1985), 이철웅(2003) 등이 피복재의 회전각을 이용하여 충격하중에 따른 피복재의 단면파괴에 대한 연구를 수행한 바 있다. 그러나 실제로 다양한 종류의 파력이 피복재에 작용할 때 피복재의 회전각을 정확히 산정한다는 것은 어려운 문제이다. 즉, 피복재의 회전각을 입사파력의 특성으로 나타내기는 곤란하다.

따라서 본 연구에서는 Melby(1990, 1993)에 의하여 제

시된 결과를 이용하는 접근방법을 사용하기로 하였다. 즉, 충격계수,  $\alpha_i$ 가 도입된 다음 식 (4)를 이용하여 충격하중에 따른 피복재 내부의 최대인장응력을 산정하는 방법이다. 이는 충격 하중에 의하여 발생하는 최대인장응력이 중복하중에 의하여 발생하는 최대인장응력보다 크다는 기존의 연구 결과에 근거한 것이다.

$$\sigma_i = \alpha_i \sigma_p, \quad \alpha_i \geq 1.0 \quad (4)$$

식 (4)는 식 (1) 및 (2)로부터 산정된 최대인장응력,  $\sigma_p$ 를 충격하중이 고려된 Melby(1990, 1993)의 결과들과 비교하여 충격계수를 산정하는 방법을 나타낸 관계 식이다. Melby(1990, 1993)는 2% 초과수준에 대하여 Dolos의 두께비에 따라 중량의 함수로 충격하중이 고려된 피복재 내부에서 발생하는 최대인장응력의 크기를 제시하였다. 충격계수 산정을 위해 수행된 비교 결과를 Fig. 2에 제시하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 동일한 입사조건에서 피복재의 중량에 따라 최대인장응력이 증가하는 등 Melby(1990, 1993)의 결과와 본 연구에서 도입된 식 (4)에 의하여 산정된 결과가 거의 일치함을 알 수 있다. Fig. 2에 충격계수의 크기를 함께 제시하였는데, Dolos 피복재인 경우 동일한 중량일지라도 두께비,  $\gamma$ 에 따라 발생하는 최대인장응력의 크기가 각기 다르게 나타나고 있다. 이와 같은 결과는 Burcharth et al.(2000)에 언급된 내용과 일치하는 것이다. 즉, 맞물림에 의한 수리학적 안정성을 해치지 않는 범위에서 Dolos 피복재의 구조적 안정성을 증가시키는 가장 쉬운 방법이 두께비를 증가시키는 것이다. 특히 Fig. 2의 두께비에 따른 결과로부터 본 연구에서 필요

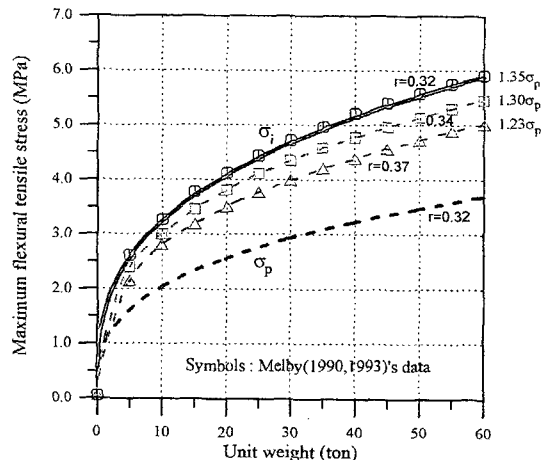


Fig. 2. Maximum flexural tensile stress versus unit weight for several dolos waist ratios.

로 하는 중요한 결과를 얻을 수 있다. Burcharth and Nielsen (1986)의 Dolos 두께비에 따른 수리학적 안정성 실험이나, Burcharth et al.(2000)에 의한 구조적 안정성 해석의 결과에 의하면 두께비,  $r=0.37$ 일때 Dolos 피복재는 TTP 피복재와 동일한 수리학적 안정성과 구조적 안정성을 보인다는 사실이다. 이미 앞에서 언급되었듯이 현재까지 이루어진 피복재의 구조적 안정성 해석 대부분이 Dolos 피복재를 대상으로 하고 있는 상황에서 기존의 자료를 TTP 피복재로 확장하여 적용할 수 있는 근거가 여기에 있다고 판단된다. 따라서 이하에서는  $r=0.37$ 의 결과를 이용하여 TTP 피복재의 수리학적 안정성과 구조적 안정성을 동시에 만족하는 피복재 중량산정 방법에 대하여 언급하겠다. 그러나 피복재의 종류와 충격하중에 대한 수리모형실험의 제약성이 해결되면 식 (1)이나 식 (2)의 접근방법을 사용하여 충격하중에 대한 보다 정확한 해석이 필요하다.

### 3. 구조적 안정성을 고려한 피복재의 중량 산정방법

분포함수를 이용하여 작용하는 하중조건에 따라 피복재 내부에서 발생하는 최대인장응력의 크기를 초과수준별로 산정할 수 있었다. 따라서 본 절에서는 이의 결과를 이용하여 피복재의 구조적 안정성을 만족할 수 있는 한계를 설정하고자 한다. 이때 Hudson의 경험식을 이용하여 수리학적 안정성도 동시에 고려할 수 있도록 하였다. 즉, 임의의 파랑조건 및 TTP 피복재의 기하학적, 재질적 성질을 가지고 수리학적 안정성과 구조적 안정성을 동시에 만족시킬 수 있는 방법을 수립하고자 한다. 해석은 다음과 같은 과정에 의하여 이루어진다. 먼저 Hudson의 경험식을 이용하여 파고의 함수로 피복재의 중량을 산정한다. 다음, 식 (1) 및 (2) 그리고 Fig. 2의 결과를 이용하여 TTP 피복재 내부에서 발생하는 최대인장응력의 크기를 앞에서 산정된 중량의 함수로 산정한다. 마지막으로 피복재의 재질적 성질인 인장 저항력과 발생된 최대인장응력의 크기를 비교한다. 이때 인장 저항력보다 피복재 내부에 발생된 최대인장응력이 크면 구조적 안정성을 만족하지 못하는 것으로 판정한다.

이상의 해석과정을 이용하여 2% 초과수준에 해당하는 응력에 대한 결과를 Fig. 3에 제시하였다. Fig. 3은 실무자들이 사용하기 편하도록 재현기간에 따른 설계 유의파고와 피복재의 중량, 그리고 인장 저항력의 관계를 나타낸 것이다. 계산에 사용된 조건은  $K_D=7.0$ , 경사는 1:1.5,

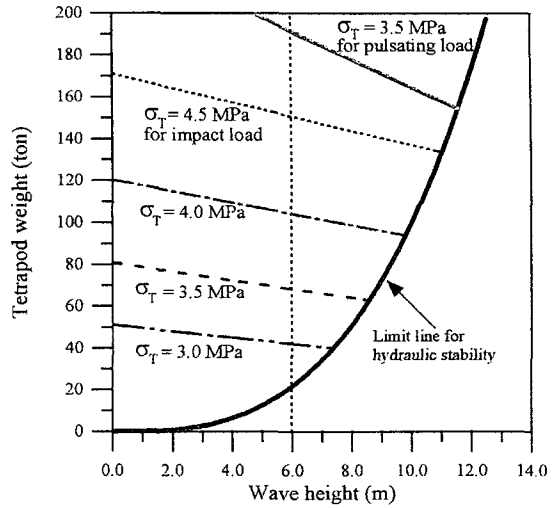


Fig. 3. Design criteria for determination of TTP armor weight with hydraulic and structural stabilities.

피복재의 밀도,  $\rho=2300 \text{ kg/m}^3$ 이다. 특히 Fig. 3에는 단면파괴에 중요한 역할을 하는 피복재의 저항 인장력,  $\sigma_T$ 의 변화에 따른 적용범위를 자세히 제시하였다. 따라서 이하에 Fig. 3을 이용하여 수리학적 안정성과 구조적 안정성을 동시에 만족하는 TTP 피복재의 적정 중량 산정방법에 대하여 간단히 언급하고자 한다. 예로 50년 재현기간의 설계 유의파고가 6.0 m라고 하면 Fig. 3에서 알 수 있듯이 수리학적 안정성을 만족하는 범위에서의 피복재 중량은 약 22 ton 이상이 되어야 한다. 이와 같은 중량은 약 5% 정도의 손실을 허용하는 범위에서 결정된 중량이다. 따라서 피복재들은 약간의 움직임 속에 수리학적 안정상태를 유지하고 있는 것이다. 만약 이와 같은 움직임에 의하여 충격하중이 작용하게 되고 피복재 내부에 일정량의 인장응력이 발생하여 그 크기가 인장 저항력을 초과하면 구조적 불안정성, 즉, 피복재의 단면파괴가 발생하게 된다. 만약 피복재의 인장 저항력이 3.0 MPa일 때 이와 같은 파괴모드에 의하여 산정된 구조적 안정성을 만족하는 범위의 피복재 중량은 45 ton이하로 제한된다. 따라서 수리학적 안정성과 구조적 안정성을 동시에 만족하는 피복재의 중량 선택범위는 22-45 ton으로 제한된다. 그러나 만약 인장 저항력이 2.5로 줄어들게 되면 그 선택범위는 상당히 줄어들어 22-25 ton이 된다. 따라서 설계에서 수리학적 안정성은 물론 이와 같은 구조적 안정성에 대한 동시적인 고려가 반드시 필요하다. 즉, 안정적으로 피복재의 중량을 결정한다는 의미에서 단지 중량만 증가시키는 것은 수리학적 안정성을 증대시킬 수는 있지만, 다른

한편으로 그와 같은 결정이 피복재의 구조적 불안정성을 유발할 수 있는 위험성에 노출된다는 것이다.

#### 4. 신뢰성 해석

이상에서는 결정론적 해석방법을 이용하여 수리학적 안정성과 구조적 안정성을 동시에 만족하는 피복재 중량 산정 방법에 대하여 설명하였다. 그러나 앞에서 언급된 바와 같이 해석과정들이 복잡할 뿐만 아니라 대부분의 결과들이 수리모형실험 자료에 근거하여 제시된 결과들이다. 따라서 각각의 과정 속에는 많은 관련변수들의 불확실성이 내재되어 있다고 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이와 같은 불확실성의 영향을 포함하기 위해 AFDA(Approximate Full Distribution Approach) 신뢰성 해석기법을 도입하여 수리학적 안정성과 구조적 안정성에 대한 신뢰성 해석을 각각 수행하였다.

먼저 수리학적 안정성에 대한 신뢰성 해석을 수행하는데 필요한 신뢰함수,  $Z_H$ 는 Hudson의 경험식으로부터 다음 식 (5)와 같이 쉽게 정의된다.

$$Z_H = A_H \Delta D_n (K_D \cot \alpha)^3 - (H_s^T + F_{H_s^T}) \quad (5)$$

여기서  $A_H$ 는 Hudson의 경험식 자체에 내포된 불확실성을 고려하기 위하여 도입된 변수,  $\Delta = \rho/\rho_w - 1$ ,  $D_n$ 은 TTP 피복재의 대표입경,  $\cot \alpha$ 는 경사, 그리고  $F_{H_s^T}$ 는 재현기간에 따른 설계 유의파고 산정시 내포된 불확실성을 고려하기 위하여 도입된 변수이다. Table 1에 제시된 바와 같이 식 (5)에서  $K_D$ 를 제외한 모든 변수를 확률변수로 고려하였다. 여러 연구자들이 제시한 자료에 의해 파고를 제외한 모든 확률변수는 정규분포를 따른다고 가정하였다. 그러나 재현기간에 따른 설계 유의파고는 극치분포의 하나인 다음 식 (6)의 Weibull 분포를 따른다고 가정하였다.

**Table 1.** Statistical properties and distributions of random variables in Eq. (5)

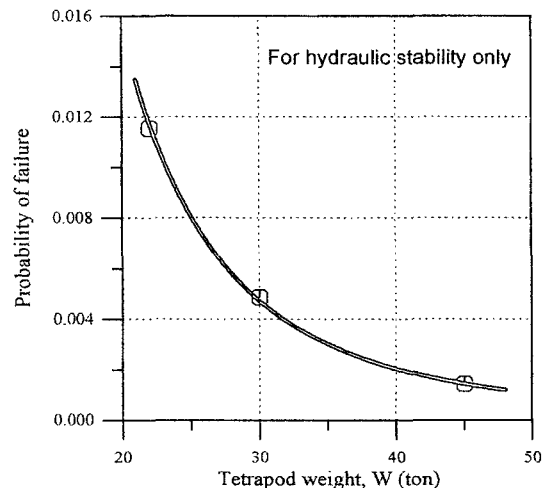
$X_i$	$\mu_{X_i}$	COV $_{X_i}$ (%)	Distribution
$K_D$	7.0	-	-
$\cot \alpha$	1.5	5.0	Normal
$\Delta$	1.3	3.8	Normal
$A_H$	1.0	18.0	Normal
$F_{H_s^T}$ (m)	0.0	25.0	Normal
$D_n$ (m)	Various	6.7	Normal
$H_s^T$ (m)	$\chi=0.79, \theta=4.0, \lambda=1.4$		Weibull

$$F(H_s^T) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{H_s^T - \theta}{\chi}\right)^\lambda\right] \quad (6)$$

여기서  $\theta, \chi$ , 그리고  $\lambda$ 는 각각 위치, 척척, 그리고 형상 계수이다. 식 (5)와 Table 1에 제시된 자료를 이용한 신뢰성 해석은 Fig. 3을 구간으로 수행되었다. 이미 전 절에서 언급된 바와 같이 50년 재현기간의 유의파고,  $H_s^T=6.0$ m에 대해 수리학적안정성을 만족하는 피복재의 중량은 22 ton 이상임이 확인되었다. 또한 인장저항력  $\sigma_T=3.0$ MPa을 갖는 피복재가 구조적 안정성을 만족하기 위해서는 중량이 45 ton이하로 제한된다는 사실도 확인되었다. 따라서 본 연구에서는 이와 같은 범위에서 중량의 변화에 따른 신뢰성 해석을 수행하였다. 식 (5)와 Table 1을 이용하여 계산된 수리학적 안정성에 대한 신뢰성 해석 결과를 Fig. 4에 제시하였다. 여기서 파괴확률은 식 (5)의 신뢰함수가 음이 되는 조건, 즉 하중이 저항력을 초과하는 상태로 정의하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 동일 파랑조건에서 파괴확률은 피복재의 중량이 증가함에 따라 지수 함수적으로 감소함을 알 수 있다. 이와 같은 거동특성은 기존의 연구자들이 제시한 신뢰성 해석 결과와 일치하는 것이다.

한편 구조적 안정성에 대한 신뢰함수,  $Z_S$ 는 Burcharth et al.(2000)에 의하여 제시된 경험식을 이용하면 다음 식 (7)과 같이 쉽게 유도할 수 있다. 식 (7)은 피복재의 단면 파괴가 일정 비율 이상으로 발생되면 구조적 불안정성이 나타난다는 개념에 근거한 것이다.

$$Z_S = B - A_B W^{-0.79} \sigma_T^{-2.73} (H_s^T)^{3.84} \quad (7)$$



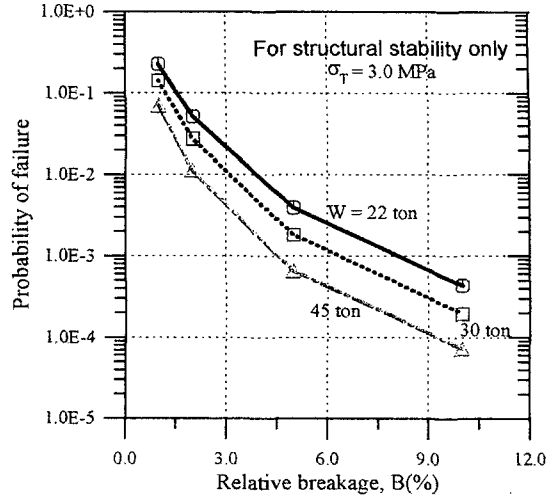
**Fig. 4.** Probability of failure versus TTP weight for hydraulic stability only.

**Table 2.** Statistical properties and distributions of random variables in Eq. (7)

$X_i$	$\mu_{X_i}$	$COV_{X_i}(\%)$	Distribution
$B(\%)$	Various	-	-
$A_B$	0.00393	25.0	Normal
$\sigma_T(\text{MPa})$	3.0	10.0	Normal
$W(\text{ton})$	Various	5.0	Normal

여기서  $B$ 는 (허용)단면파손율이고,  $A_B$ 는 경험상수,  $W$ 는 피복재의 중량(ton)을 의미한다. CIAD(1985) 등의 몇몇 연구자들에 의하면 경사면에 피복된 피복재의 전체 개수 중에  $B=10\text{-}15\%$ 가 구조적 불안정성에 의해 단면파괴 되면, 이는 즉각적인 수리학적 불안정성으로 이어져 경사체 체체의 전체적인 파괴로 이어진다. 이와 같은 파괴모드는 다음과 같이 설명될 수 있다. 즉, 피복재가 구조적 안정성을 만족하지 못하여 단면파괴가 발생하게 되면 해당 피복재의 중량은 절대적으로 감소되어 이동이 자유로울 뿐만 아니라 파손된 피복재는 다른 피복재와 충돌하여 새로운 충격하중으로 작용하게 된다는 것이다. 구조적 안정성에 대한 신뢰성 해석은 수리학적 안정성에서 언급된 조건과 동일한 상태에서 수행되었다. 다만 파괴상태의 정의에 따라 단면파손율을 변화시키면서 파괴확률이 산정되었다는 점이 다르다. 식 (7)을 이용하여 신뢰성 해석에 사용된 각 확률변수들의 통계적 특성과 분포함수를 Table 2에 제시하였다. 이와 같이 산정된 구조적 안정성에 대한 신뢰성 해석 결과를 Fig. 5에 제시하였다. 인장 저항력 3.0 MPa를 만족하는 범위의 중량에 대하여 계산된 결과이기 때문에 중량이 커짐에 따라 파괴확률이 감소하는 경향을 보여주고 있다. 또한 파손율, 가 커짐에 따라 파괴확률은 급격히 감소한다는 사실을 그림으로부터 쉽게 알 수 있다. 이와 같은 결과는 허용 파손율의 개념을 도입하여 해석한 이철응(2003)의 결과에서도 확인할 수 있었다.

마지막으로 본 연구에서는 이상의 두 파괴모드를 종합적으로 해석할 수 있는 신뢰성 방법에 대하여 살펴보았다. 즉, 피복재가 안정하기 위해서는 이상에서 언급된 수리학적 안정성과 구조적 안정성을 동시에 만족해야 한다. 만약 어느 한 파괴모드가 발생되면 이는 다른 파괴모드로 즉각적으로 이어지기 때문이다. 따라서 식 (5)와 (7)에서 수립된 두 파괴모드는 직렬계(series system)로 구성될 수 있다. 두 개 이상의 파괴모드로 구성된 계의 파괴확률을 산정하는 것은 각 파괴모드간의 상관성에 따라 달라질 수 있기 때문에 해석상 어려움이 많다(Thoft-Christensen and Baker, 1982). 따라서 본 연구에서는 간단하게 다음 식



**Fig. 5.** Probability of failure versus relative breakage for structural stability only.

(8)을 이용하여 직렬계의 파괴확률에 대한 상한치와 하한치를 계산하였다.

$$(P_f)_S^U = 1 - [1 - (P_f)_H][1 - (P_f)_S] \tag{8a}$$

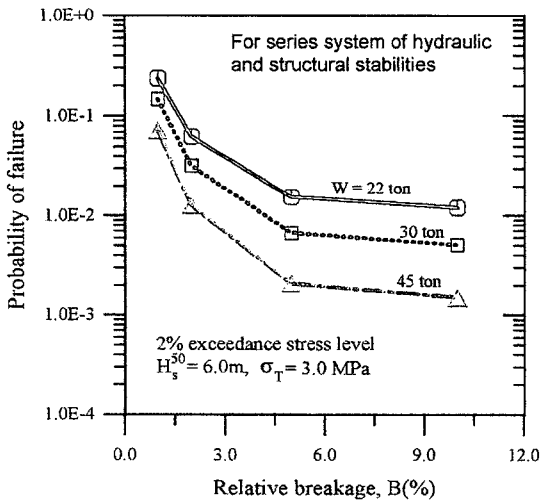
$$(P_f)_S^L = \max[(P_f)_H, (P_f)_S] \tag{8b}$$

여기서  $(P_f)_S^U$ ,  $(P_f)_S^L$ 는 각각 직렬계의 파괴확률에 대한 상한치와 하한치, 그리고  $(P_f)_H$ ,  $(P_f)_S$ 는 각각 식 (5)와 식 (7)에 의하여 산정된 파괴확률이다. 이론적으로 식 (8a)는 두 파괴모드가 완전한 상관성을 갖을 때의 결과이고, 식 (8b)는 두 파괴모드가 서로 상관성이 없는 경우의 결과이다. 식 (8)에 의하여 산정된 파괴확률의 결과를 Table 3에 제시하였다. 또한 Table 3의 결과에서 파괴확률의 상한치를 Fig. 6에 제시하였다. Table 3이나 Fig. 6에 의하면 파손율,  $B$ 가 작은 경우는 구조적 안정성에 의하여 피복재의 전체적인 안정성이 지배되고, 파손율이 큰 경우는 수리학적인 안정성이 피복재의 안정성을 지배하게 된다. 따라서 파손율이 5% 이상이 되면 피복재의 파괴확률은 수리학적 불안정성에 의하여 발생하는 파괴확률로 접근하는 것을 알 수 있다. 본 계산 예에 5%의 파손율을 적용한다면 실질적으로 피복재의 전체적인 안전성은 수리학적 안정성에 의하여 지배된다는 것을 알 수 있다.

한편 신뢰성 해석에 기초한 피복재 중량의 최적 결정 방법에 대하여 언급하는 것도 상당한 의미가 있다고 판단된다. 따라서 이하에서는 Fig. 6을 이용한 피복재 최적 중량 산정방법, 즉, 신뢰성설계법에 대하여 간단히 설명

**Table 3.** Probabilities of failure calculated by Eq. (5), (7) and (8)

W(ton)	$(P_f)_H$	B(%)	$(P_f)_S$	$(P_f)_S^U$	$(P_f)_S^L$
22	0.01156	1	0.22874	0.23766	0.22874
		2	0.05208	0.06304	0.05208
		5	0.00394	0.01545	0.01156
		10	0.00043	0.01199	0.01156
30	0.00487	1	0.14321	0.14738	0.14321
		2	0.02768	0.03242	0.02768
		5	0.00183	0.00669	0.00487
		10	0.00020	0.00507	0.00487
45	0.00142	1	0.07078	0.07210	0.07078
		2	0.01133	0.01273	0.01133
		5	0.000666	0.00207	0.00142
		10	0.00007	0.00149	0.00142



**Fig. 6.** Probability of failure for a series system of hydraulic and structural stabilities.

하겠다. 수리학적 안정성과 구조적 안정성을 직렬계로 고려할 때 피복재의 파손율,  $B$ 에 따른 TTP 피복재의 최적 중량을 산정하고자 한다. 만약 직렬계의 목표파괴확률이 0.005로 주어졌을 때, 피복재의 인장 저항력이 3.0 MPa 인 경우에 파손율에 따른 최적 TTP 피복재의 산정 결과를 Table 4에 제시하였다. 여기서 목표파괴확률 0.005는 매년 동일한 하중 사상이 독립적으로 발생되더라도 내용년수 50년의 파괴확률이 25% 미만일 수 있도록 고려된 것이다. Table 4의 결과는 Fig. 3과 Fig. 6을 동시에 사용하여 얻어진 것이다. 즉, Fig. 6에서 각각의 파손율과 목표파괴확률이 만나는 점에 해당하는 피복재의 중량이 최적중량이 된다. 예로  $B=10\%$ 와 목표파괴확률이 만나는 점은 중량 30 ton의 곡선과 일치한다. 그러나  $B=5\%$ 와 목

**Table 4.** Application of Reliability-based design method to the optimal determination of TTP armour weights

B(%)	$W_{opt}$ (ton)
1	Approximate 80 if and only if $\sigma_T=4.0$ MPa
2	Approximate 60 if and only if $\sigma_T=3.5$ MPa
5	35
10	30

표파괴확률이 만나는 점은 중량 30 ton과 45 ton 사이에 존재한다. 따라서 보간법을 이용하면 최적 중량은 약 35 ton이 된다. 그러나 단면파손율  $B=1\%$  또는  $2\%$ 인 경우에는 목표파괴확률과 만나는 점이 45 ton 선보다 훨씬 아래 위치하고 있다. 이는 Fig. 3에서 알 수 있듯이 본 조건에서는 인장 저항력의 범위를 초과하는 영역이다. 따라서 이와 같은 경우에는 우선적으로 인장 저항력을 3.5나 4.0 MPa로 증가할 때 만 선택된 피복재의 중량이 구조적 안정성을 만족하게 된다. 만약 인장 저항력의 증가 없이 피복재의 중량만을 증가시키게 되면 구조적 불안정성에 의하여 피복재의 단면파괴가 발생할 것이고, 동반하여 수리학적 불안정성에 의한 경사제 단면 체체의 전반적인 파괴가 발생할 수 있다.

### 5. 결 론

경사제의 설치위치가 점차 심해로 확장되면서 사용되는 피복재의 중량도 점점 증가하고 있다. 과거 피해 사례의 원인분석에 의하면 피복재의 중량이 증가하면 수리학적 안정성보다는 구조적 안정성에 의하여 피복재의 안정성이 지배되는 것을 알 수 있다. 그럼에도 불구하고 아직까지 경사제 피복재의 안정성 해석에서는 구조적 안정



성을 무시한 채 단지 수리학적 안정성만을 고려하는 경향이 있다. 본 연구에서는 수리학적 안정성과 구조적 안정성을 동시에 만족시키면서 피복재의 적정 중량을 산정할 수 있는 방법을 수립하였다. 또한 두 안정조건에 대한 신뢰성 해석을 수행하여, 최적중량을 결정할 수 있는 확률론적인 설계법이 제시되었다.

수리학적인 안정성은 현재 실무에서 가장 많이 사용되고 있는 Hudson의 경험식을 이용하여 수립되었다. 한편 피복재의 구조적 안정성을 해석하기 위해서 충격하중을 포함하는 여러 하중조건에 대해 피복재 내부에 발생하는 최대인장응력을 먼저 산정하였다. 즉, 피복재 내부에서 발생하는 최대인장응력이 피복재의 인장 저항력의 크기를 상회할 때 구조적 불안정성, 즉, 피복재의 단면파괴가 발생한다는 개념을 이용하였다. 수리모형실험을 통하여 관측된 Dolos 피복재에 대한 자료를 근간으로 Burcharth et al.(1991)이 제시한 분포함수를 이용하여 초과수준별로 피복재 내부에서 발생하는 최대인장응력을 산정할 수 있었다. 이와 같이 산정된 최대인장응력에 충격하중의 효과를 포함하기 위하여 Melby(1990, 1993)의 자료를 이용하여 충격계수를 도입할 수 있었다. 또한 Burcharth and Nielsen (1986)의 Dolos 두께비에 따른 수리학적 안정성 실험과 Burcharth et al.(2000)에 의한 구조적 안정성 해석의 결과를 이용하여 Dolos 피복재의 자료들이 TTP 피복재에도 확대되어 사용될 수 있음을 확인할 수 있었다. 이와 같은 개념하에 수리학적 안정성과 구조적 안정성을 동시에 만족하는 TTP 피복재의 중량 산정방법을 실무자들이 쉽게 사용할 수 있도록 재현기간별 설계 유의파고와 자중, 그리고 인장 저항력의 함수로 제시하였다. 이와 같은 산정방법을 이용하면 인장 저항력의 범위에서 수리학적 안정성을 극대화 할 수 있는 피복재의 중량을 결정할 수 있다.

한편 결정론적 산정방법의 불확실성을 고려하기 위하여 AFDA 신뢰성 해석기법을 도입하여 수리학적 안정성과 구조적 안정성에 대한 각각의 신뢰성 해석을 수행하였다. 특히 구조적 안정성에 대한 신뢰성 해석에서는 Burcharth et al.(2000)의 경험식을 이용하여 피복재의 단면파괴율의 함수로 파괴확률을 산정할 수 있었다. 이는 수리학적 안정성 해석에서 사용하는 손실율의 개념과 유사한 것이다. 마지막으로 수리학적 안정성과 구조적 안정성을 하나의 직렬계로 고려하여 두 안정조건을 동시에 고려한 신뢰성 해석 결과를 제시하였다. 이와 같은 결과를 이용하면 목표파괴확률과 단면파괴손실율의 함수로 최적의 피복재 중량 산정을 위한 신뢰성 설계를 수행할 수 있다.

## 참고문헌

- 이철용 (2003). 콘크리트 피복재의 단면파괴에 대한 신뢰성 해석. 한국해안·해양공학회지, 15(2), 86-96.
- Anglin, C.D., Scott, R.D., Turcke, D.J. and Turke, M.A. (1990). The development of structural design criteria for breakwater armor units. Proc. Stresses in Con. Armor Units, ASCE, 123-148.
- Baird, W.F., Readshaw, J.S., Scott, R.D. and Turcke, D.J. (1986). A procedure for the analysis and design of concrete armor units. Proc. 20th. Int. Coast. Engrg. Conf., ASCE, 1739-1753.
- Burcharth, H.F. (1981). Full-scale dynamic testing of Dolos to destruction. Coast. Engrg., 4, 229-251.
- Burcharth, H.F. and Brejnegaa-Nielsen, T. (1986). The influence of waist thickness of Dolosse on the hydraulic stability of Dolosse armour. Proc. 20th. Int. Coast. Engrg. Conf., ASCE, 1783-1796.
- Burcharth, H.F., d'Angremond, K., Van der Meer, J.W. and Liu, Z. (2000). Empirical formula for breakage of Dolosse and Tetrapods. Coast. Engrg., 40, 183-206.
- Burcharth, H.F., Howell, G.L. and Liu, Z. (1991). On the determination of concrete armour unit stresses including specific results related to Dolosse. Coast. Engrg., 15, 107-165.
- CIAD (1985). Computer aided evaluation of the reliability of a breakwater design. Zoetermeer, Netherlands, 105-121.
- Franco, L., Noli, A., Girolamo, P.D. and Ercolani, M. (2000). Concrete strength and durability of prototype tetrapods and dolosse: Results of field and laboratory tests. Coast. Engrg., 20, 207-219.
- Howell, G.L. (1988). Measurements of forces on Dolos armor units at prototype scale. Proc. 21st. Int. Coast. Engrg. Conf., ASCE, 2355-2369.
- Lin, W.M., Rau, C. and Su, R.L. (1986). The structural responses of Dolos armor units under the dynamic loading. Proc. 20th. Int. Coast. Engrg. Conf., ASCE, 2065-2078.
- McDougal W.G., Melby, J.A. and Tedesco, J.W. (1988). Wave forces on concrete armor units. J. of Waterway, Port, Coast. and Ocn. Engrg., ASCE, 114(5), 582-598.
- Melby, J.A. (1990). An overview of the Crescent city Dolos design procedures. Proc. Stresses in Con. Armor Unit, ASCE, 312-326.
- Melby, J.A. (1993). Dolod design procedure based on Crescent city prototype data. Tech. Rep. CHL-99-17, U.S. Army Eng. Waterways Exp. MS, St., CERC, Vicksburg.
- Melby, J.A. and Howell, G.L. (1989). Incorporation of prototype Dolos static response in Dolos. XXIII Congr. Int. Assoc.

- Hyd. Res., Ottawa, Canada.
- Nishigori, W., Endo, T. and Shimada, A. (1986). On stress in Tetrapods under wave action. Proc. 20th. Int. Coast. Engrg. Conf., ASCE, 2119-2132.
- PIANC (1992). Analysis of rubble mound breakwaters. Permanent Int. Assoc. of Navig. Cong., Belgium.
- Scott, R.D., Turcke, D.J. and Baird, W.F. (1986). A unique installation scheme for measuring loads in model Dolod units. Proc. 20th. Int. Coast. Engrg. Conf., ASCE, 2212-2223.
- SPM (1984). Coastal Engineering Research Center, US Army Corps Engineers, Washington, DC.
- Tedesco, J.W. and McDougal, W.G. (1985). Nonlinear dynamic analysis of concrete armour units. Computers and Structs., 21, 189-201.
- Thoft-Christensen, P. and Baker, M.J. (1982). Structural reliability theory and its applications. Springer-Verlag, New-York.
- Timco, G.W. (1983). On the structural integrity of Dolos units under dynamic loading conditions. Coast. Engrg., 7, 91-101.
- Zwamborn, J.A. and Phelp, D. (1990). Structural tests on Dolosse. Proc. of Stresses in Con. Armor Units, ASCE, 40-60.
- Zwamborn, J.A., Scholtz, D.J.P. and Claassens, H. (1988). Stability and structural behaviour of strength improved Dolosse. Proc. 21st. Int. Coast. Engrg. Conf., ASCE, 2075-2089.
- 
- Received May 18, 2004  
Accepted July 21, 2004