

# 해양 가이드-타워의 고정말뚝에 대한 신뢰도 해석

## Reliability Analysis of Offshore Guyed Tower against Anchor Pile Failures

류 정 선\*  
Ryu, Chung Son  
윤 정 방\*\*  
Yun, Chung Bang  
강 성 후\*  
Kang, Seong Hoo

### 요 약

해양 가이드-타워에 관하여 폭풍 발생시, 계류장치 고정말뚝의 파괴를 주안점으로한 신뢰도해석 방법에 대하여 연구하였다. 말뚝의 파괴는 최대하중에 대한 것과 반복하중에 대한 것의 두가지 조건을 고려하였다. 최대하중으로 인한 파괴확률은 최초발생확률의 산정방법을 사용하였다. 반면, 반복하중으로 인한 파괴확률은 점토층에 타설된 말뚝에 대한 피로곡선을 바탕으로하여 구하였다. 불규칙파랑에 대한 구조물의 동적해석은 비선형문제의 선형화를 통한 주파수영역 해석으로부터 효율적으로 수행되었다. 수치해석결과, 말뚝지지력의 평균 안전도가 낮고 이의 분산계수가 클수록, 반복하중으로 인한 파괴확률이 최대하중으로 인한 파괴확률과 같은 수준으로 커짐을 알 수 있었다.

### Abstract

For the reliability analysis of offshore guyed towers for large storm events, failure of an anchor pile of the guyline system is investigated. Two failure modes of the anchor pile due to the extreme and the cyclic wave loadings are considered. The probability of failure due to the extreme anchor load is evaluated based on the first excursion probability analysis. Degradation of the pile capacity due to cyclic loadings is evaluated by using empirical fatigue curves for a driven pile in clay. The numerical results indicate that the failure probability due to the cyclic loadings can be as large as the risk due to extreme loading, particularly for the cases with the low design safety level of the pile strength and the large uncertainty of the pile resistance.

### 1. 서론

본 논문에서는 불규칙 파랑하중에 대한 Off-

shore Guyed Tower의 신뢰도해석 방법에 대하여 연구하였다. 특히 계류선(Guyline)의 고정말뚝에 대한 신뢰도 문제를 주안점으로 하였다. Guyed

\* 동신대학교 토목공학과  
\*\* 한국과학기술원 토목공학과

이 논문에 대한 토론은 1991년 12월 31일까지 본학회에 보내주시면 1992년 6월호에 그 결과로 게재하겠습니다.

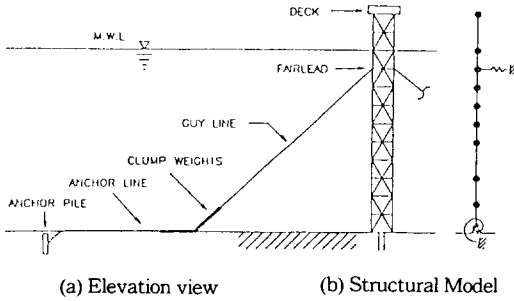
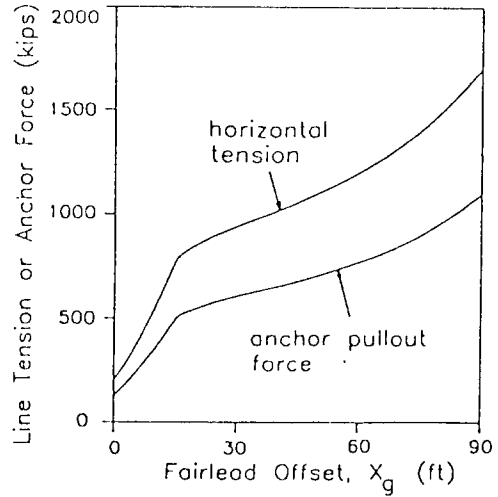


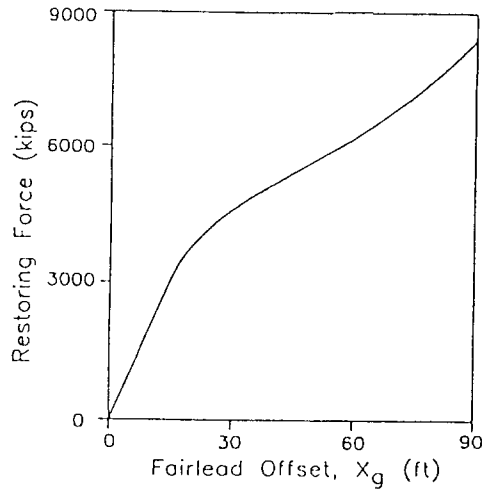
Fig. 1 Structural Configuration of an Offshore Guyed Tower

Tower는 심해의 해저석유생산을 위하여 비교적 최근에 개발된 해양구조물의 일종으로서,<sup>1),2),3)</sup> 그림 1과 같이 수평단면의 크기가 균일한 철제 Tower와 이에 수평지지를 제공하는 방사형상의 계류선들로 구성되어 있어서, 구조적으로 유연성이 매우 큰 특징이 있다. 각 계류선은 Catenary 부분, Clump-weight, Anchor-line 그리고 고정말뚝 (Anchor Pile)으로 이루어져 있다. 보통의 기상조건에서는 계류선시스템의 강성이 크지만, 큰 폭풍의 기상조건에서는 Clumpweights가 해저면에 들리고 계류선시스템의 강성이 현저히 저하되도록 설계되어 있다. 따라서 계류장치(Guying System or Cable Array)의 수평방향 복원력은 그림 2와 같이 기하학적 비선형이다. 멕시코만에서 운영되도록 설계된 Guyed Tower의 신뢰도는 계류선의 파괴나 Tower 주말뚝(Main Pile)의 좌굴을 고려할 때, 재래의 자켓식 해양구조물 만큼의 신뢰도를 보인 것으로 보고된 바 있다.<sup>3)</sup> 본 논문에서는 큰 폭풍의 작용시 계류장치의 고정말뚝의 수직인발(Pull-out)에 대한 신뢰도를 분석하였다.

해양구조물에 대한 신뢰도해석 문제는 지금까지 많은 연구가 보고되었다. 자켓식고정구조물을 대상으로하여 신뢰성설계를 위한 수식화가 발표되거나,<sup>4)</sup> 설계수명동안의 파괴확률을 구하는 과정이 제안되었다.<sup>5)</sup> 한편, 인장각식 플랫폼이나 반잠수식 플랫폼, Guyed Tower의 계류선의 신뢰도에 대한 연구가 발표된 바 있다.<sup>6),7),8)</sup> 점토층에 타설된 말뚝의 인장지지력에 대한 통계적인 연구결과도 많이 발표되었는데,<sup>9),10)</sup> 말뚝지지력의 분포는 대수정규분포(Lognormal Distribution)로 주로 알려져 있다. 또한 최근에는 해양구조물에 작용하



(a) For a Guyline



(b) For the Guyline System

Fig. 2 Nonlinear Restoring Force of the Guyline System

는 반복하중이 말뚝의 지지력에 미치는 영향도 발표되었다.<sup>10),11),12),13)</sup> 특히 문헌 12는 반복하중으로 인한 말뚝의 파괴에 대하여 연구하여, 말뚝의 '피로곡선'을 개발하여 하중의 크기와 파괴에 이르는 하중의 반복횟수의 관계를 나타내 보였다.

본 연구에서는 고정말뚝에 관한 두가지의 파괴모우드를 고려하였다. 하나는 큰 폭풍이 발생할 때 최대하중으로 인한 말뚝의 인발파괴이고, 다른 하나는 폭풍중 말뚝에 지속적으로 발생하는 반복하중에 의한 축방향 지지력의 감소로 인한 피로파

피이다. 문헌 8에서는 고정말뚝의 파괴가 Guyed Tower의 신뢰도에 지배적인 역할을 한다는 결과가 발표된 바 있는데, 이는 최대하중에 관련된 파괴모우드에 대한 것이다. 작은 파고조건에서는 무거운 Clumpweight가 해저면에서 들리지 않으므로 말뚝에 작용되는 하중이 작다. 그러나, 큰 폭풍에는 Clumpweight가 들리므로 말뚝에 작용되는 하중의 크기도 커지고, 아울러 반복하중으로 인한 말뚝 지지력의 감소가 문제를 야기시킬 수 있다. 따라서, 본 논문에서 이러한 관점으로 신뢰도를 고찰하였다. 고정말뚝의 토질조건은 전반적으로 비배수 보통암밀된 점토층으로 간주하였다.

불규칙파랑에 대한 동적해석은 운동방정식의 비선형 항들에 대한 등가선형화를 이용하여 주파수영역에서 하였다. 폭풍의 발달과정은 문헌 5와 같이 크기가 다른 일련의 정상과정의 파고조건들로 모형화했다. 선형화된 구조계의 동적거동특성은 각각의 파괴조건에서 정상-정규과정(Stationary Gaussian Process)로 가정하였다. 최대하중에 대한 신뢰도문제에 있어서 말뚝에 작용하는 하중의 최대값은 최초발생에 대한 확률해석(First Excursion Probability Analysis)로부터 산정하였고, 반복하중에 대한 말뚝의 파괴확률은 문헌 12에 발표된 피로곡선을 사용하여 산정하였다. 가상적인 Guyed Tower에 대한 예제해석의 결과는 폭풍의 지속기간이 길어지면 반복하중으로 인한 파괴확률은 이에 민감하게 꾸준히 증가하는 경향을 보였다. 또한, 반복하중으로 인한 파괴확률은 말뚝의 안전도가 비교적 낮고, 지지력 및 피로수명의 분산계수가 높을 경우에는 최대하중으로 인한 파괴확률과 비슷한 수준으로 커짐을 알 수 있었다.

2. 동적거동의 해석

구조물의 동적거동해석을 위해서 그림 1.b와 같이 Tower는 집중질량의 등가기동으로, 계류장치는 수평방향의 비선형 스프링으로 모형화하였다. 계류장치의 복원력은 정역학적으로 구했는데, 그림 2에 보인 바와 같이 15ft 이상의 변위에 대해서 강성이 급격히 감소하는 비선형으로 나타

났다. 구조물의 자중을 지반으로 전달하는 주 말뚝(Main Piles)이 Tower의 중앙부에 집중되어 타설되어 있으므로, 해저면에서의 구조물의 휨강성은 강성이 작은 회전스프링으로 모형화했다.

구조모형의 파랑하중에 대한 운동방정식은 다음과 같다.

$$[M]\{\ddot{X}\} + [C]\{\dot{X}\} + [K]\{X\} + \{1_g\}R(x_g) = \{F_{wc}\} + \{F_{wd}\} \tag{1}$$

여기서  $\{X\}$ ,  $\{\dot{X}\}$ ,  $\{\ddot{X}\}$  = 각각 수평변위, 속도, 가속도 벡터;  $x_g$  = 계류점의 수평변위;  $[M]$  = 질량행렬;  $[C]$  = 감쇠행렬;  $[K]$  = 강성행렬;  $R(x_g)$  = 계류장치의 비선형 복원력;  $\{1_g\}$  = 계류점의 변위방향으로 1, 나머지는 0인 상수벡터;  $\{F_{wc}\}$  = 파랑 및 조류하중 벡터;  $\{F_{wd}\}$  = 풍하중벡터를 나타낸다. 식(1)은 두 가지 비선형항을 포함하고 있는데, 하나는 계류장치의 복원력이고 다른 하나는 파랑하중의 비선형 점성저항력이다. 후자는 다음과 같이 Morison 방정식으로<sup>14)</sup> 나타내질 수 있다.

$$\{F_{wc}\} = \left[ \frac{1}{2} \rho C_d A \{ (V_w + V_c - \dot{X}) | V_w + V_c - \dot{X} \} + [\rho C_m \nabla] \{ \dot{V}_w \} - [\rho (C_m - 1) \nabla] \{ \dot{X} \} \right] \tag{2}$$

여기서  $\{V_w\}$ ,  $\{\dot{V}_w\}$  = 각각 물입자의 속도 및 가속도 벡터;  $\{V_c\}$  = 조류의 속도 벡터;  $C_d$ ,  $C_m$  = 각각 유동의 점성계수 및 관성계수;  $[A]$ ,  $[\nabla]$  = 각각 대각행렬로서 부재의 유동방향 사영면적과 구조물이 밀어낸 물의 부피를 나타낸다.

불규칙파랑에 대한 해양구조물이 비선형 동적거동해석에는 두가지 방법이 주로 사용되는데, 하나는 유동의 인공 불규칙시계열을 이용한 시간영역 해석방법이고,<sup>15),16)</sup> 다른 하나는 비선형항을 선형화한 후에 적용하는 주파수해석 방법이다.<sup>17),18),19)</sup> 전자는 선형화과정이 없이 바로 비선형문제의 해를 얻을 수 있는 이점이 있으나, 여러 경우의 인공 불규칙 유동시계열을 작성하여야 하므로 많은 시간이 소요된다. 본 연구에서는 다음에 설명하는 바와 같은 추계론적 선형화기법을 사용하여, 주파수영역 해석을 수행하였다.

그림 2의 계류장치의 비선형복원력은 다음과

같이 계류점의 수평변위( $x_g$ )의 5차 다항식으로 근사화하였다.

$$R(x_g) = k_0 x_g + d_1 x_g^3 + d_2 x_g^5 \quad (3)$$

여기서  $k_0, d_1, d_2$  등은 최소사승법으로 결정하였다.

식(3)에 대한 1차선형식은 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$R(x_g) \approx k_{eqv} x_g + R_0 \quad (4)$$

여기서  $k_{eqv}$ 는 등가 선형강성이고,  $R_0$ 는 구조물의 평균변위(정적성분)로부터 기인하는 상수이다. 문헌 19에서는  $x_g$ 가 정상 정규과정이라고 가정하여 구한  $k_{eqv}$  및  $R_0$ 에 대한 표현식을 보여주고 있다.

파랑 및 조류로 인한 하중중에, 비선형 점성저항력은 다음과 같이 선형화 될 수 있다.

$$\left[ \frac{1}{2} \rho C_d A \right] \{ (V_w + V_c - \dot{X}) | V_w + V_c - \dot{X} \} = [C_1] \{ V_w - \dot{X} \} + [C_2] \{ V_c \} \quad (5)$$

여기서  $[C_1]$ 과  $[C_2]$ 는 대각행렬이며, 이에 대한 표현식들도 또한 문헌 19에 나타나있다. 식(4) 및 (5)의 선형화 계수들은 거동의 평균 및 표준편차와 관련되어 있으므로,<sup>19)</sup> 반복계산과정으로 거동의 해를 구하게 된다.

식(4)와 (5)를 식(1)에 대입하면 다음의 선형화 운동방정식을 얻게된다.

$$\begin{aligned} [M + M_d] \{\ddot{X}\} + [C + C_1] \{\dot{X}\} + [K] \{X\} + \{1_g\} k_{eqv} x_g \\ = [C_1] \{V_w\} + [\rho C_m \nabla] \{\dot{V}_w\} + [C_2] \{V_c\} - \{1_g\} R_0 + \{F_{wd}\} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서  $[M_d]$ 는 유동의 부가질량 ( $=[\rho(C_m - 1) \nabla]$ )이다.

식(6)은 구조물의 거동을 다음과 같이 정적성분과 동적성분으로 나누어 해를 구할 수 있다.

$$\{X\} = \{X_s\} + \{X_d\} \quad (7)$$

여기서  $\{X_s\}$ 는  $\{V_c\}, \{F_{wd}\}$  및  $R_0$ 와 관련된 정적거동이고  $\{X_d\}$ 는  $\{V_w\}, \{\dot{V}_w\}$ 와 관련된 동적거동이

다.

스펙트럼 해석으로부터 불규칙파에 대한 구조물 거동의 스펙트럼 (Power Spectral Density)을 얻을 수 있으며, 이들로부터 거동의 평균값( $E\{X_{ij}\}$ ) 및 표준편차( $\sigma_{xi}$ )가 다음과 같이 산정된다.

$$E\{X_{ij}\} = X_{si} \quad (8)$$

$$\sigma_{xi} = \sigma_{x_{di}} = \left\{ \int_0^\infty S_{x_{di}x_{di}}(\omega) d\omega \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

$$\sigma_{\dot{x}_i} = \sigma_{\dot{x}_{di}} = \left\{ \int_0^\infty \omega^2 S_{x_{di}x_{di}}(\omega) d\omega \right\}^{\frac{1}{2}}$$

### 3. 하중의 통계적 모형화

구조물에 작용하는 외력은 주로 파랑 및 조류하중, 풍하중 그리고 자중 등이 있다. 자중은 Tower의 수평변위에 따른 전도모멘트를 유발시키는데, 이 영향( $P-\Delta$ )은 구조물의 강성행렬에 기하학적 강성항을 포함시킴으로 고려하였다. 파랑, 조류, 바람등에 의한 하중은 풍속, 유의파고(Significant Wave Height), 파주기등 여러 파라메타로 나타내지는 파고조건(Seastate)에 따른다. 문헌 7은 위의 파라메타들의 상관도를 고려하여 계류식 해양구조물에 대한 다중하중과정 (Multiple Load Process)에 관하여 연구한 바 있다. 본 논문에서는 간단한 방법으로, 풍속과 파고조건과의 근사적인 관계식을 이용하여 유의파고 하나로써 기상상태를 나타내었다. 멕시코만에서 이들의 근사적인 관계식은 문헌 5와 20 등을 참조하면, 다음과 같이 구해진다.

$$V_{wd} = 7.267 H_s^{0.805} \quad (11)$$

여기서  $V_{wd}$ =수평 위 64ft 에서의 1시간 평균풍속 (ft/sec);  $H_s$ =유의파고(ft)이다.

큰 폭풍은 지속기간이 길기때문에 파고조건은 비정상과정(Nonstationary)의 특징을 가진다. 문헌 5와 21을 참조하여, 그림 3에 보인 바와 같이 폭풍의 발달과정을 일련의 정상과정의 파고조건들로 모형화하였다. 식(11)의 관계식을 기초로하여 예제구조물에 작용하는 풍하중을 다음과 같이 산정하였다.

$$F_{wd} = 2.35H_s^{1.61} \quad kips \quad (12)$$

해류의 영향은 물입자의 속도를 증가시키는 방법으로 고려하였다. 즉 바람으로 인한 해류성분에 대하여는 수면에서는 풍속의 2%에 해당하는 유속을 증가시켰고, 그 이하는 선형적으로 감소하여, 수면하 200ft 이하에서는 소멸되는 것으로 하였다. 조류성분(Tidal Current)은 전 수심에 걸쳐서 0.9 knots로 가정하였다.

본 논문에서 파랑의 불규칙성을 다음과 같은 ITTC의 파고스펙트럼을<sup>22)</sup> 사용하여 나타내었다.

$$S_{\eta\eta}(\omega; H_s) = \alpha g^2 \omega^{-5} \exp[-4\alpha g^2 / (H_s^2 \omega^4)], \quad 0 < \omega < \infty \quad (13)$$

여기서  $\alpha = 0.0081$ ;  $g$  = 중력가속도;  $\omega$  = 파 주파수;  $\eta$ 는 수면의 높이이다.

#### 4. 최대하중에 대한 고정말뚝의 파괴확률

폭풍이 발생했을 때 최대하중으로 인한 고정말뚝의 파괴확률은 다음식으로 산정할 수 있다.

$$P_f = \int_0^\infty \int_0^\infty [1 - F_{S_m}(r, y)] f_Y(y) f_R(r) dy dr \quad (14)$$

여기서  $Y$  = 폭풍의 강도를 나타내는 최대파고조건( $H_{s, max}$ )의 최대값;  $S_m$  = 강도  $y$ 의 폭풍동안에 고정말뚝에 작용되는 인발하중( $S$ )의 최대값;  $R$  = 말뚝의 지지력;  $F_{S_m}(s, y) = S_m$ 의 확률분포함수;  $f_Y(y)$ ,  $f_R(r)$  = 각각  $Y$ 와  $R$ 의 확률밀도함수를 나타낸다.

말뚝의 최대하중에 대한 확률분포는  $S$ 가  $x_g$  (계류점의 변위)에 대한 단순증가함수이므로, Tower 거동의 최대값분포와는 아래와 같이 연관된다.

$$F_{S_m}(s, y) = F_{X_g}(x_g(s); y) \quad (15)$$

여기서  $F_{X_g}(x_g(s); y)$ 는  $X_g$ 의 극대값분포함수이다. 본 논문에서 하나의 폭풍을 일련의 정상과정의 파고조건들의 성장과 쇠퇴로 모형화하였으므로 (그림 3), 지속시간이  $t_s$ 인 폭풍에 대한 구조물거동의 최대값분포는 최초발생확률의 해석으로부터  $F_{X_g}(x_g; y)$ 를 아래와 같이 구하였다.

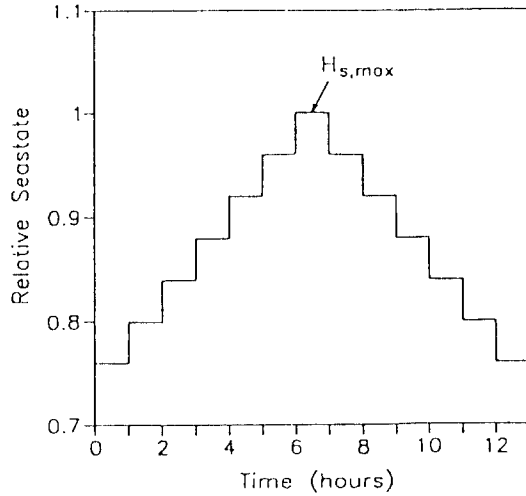


Fig. 3 Average Seastate Buildup and Decay

$$F_{X_g}(x_g; y) = \exp\left(-\sum_{i=1}^l \nu_i(x_g) t_i\right) \quad (16)$$

여기서,  $\nu_i(x_g) = i$  번째 파고조건하에서 계류점변위가 특정한 값( $x_g$ )를 초과하게 되는 시간당 평균 통과율;  $t_i = i$  번째 파고조건이 지속시간;  $l$  = 큰 폭풍의 모형화에 고려되는 파고조건수의 갯수를 나타낸다( $t_s = \sum_{i=1}^l t_i$ ).

파랑을 Gaussian과정으로 가정하면 선형화된 구조계의 거동 역시 Gaussian과정이므로, 문헌 23를 참조하여  $X_g$ 의 평균통과율을 다음식으로 얻을 수 있다.

$$\nu_i(x_g) = \frac{\sigma_{\dot{X}_{gi}}}{2\pi\sigma_{X_{gi}}} \exp\left\{-\frac{1}{2} \left(\frac{x_g - \bar{X}_{gi}}{\sigma_{X_{gi}}}\right)^2\right\} \quad (17)$$

여기서  $\bar{X}_{gi} = X_{gi}$ 의 평균값;  $\sigma_{X_{gi}}$ ,  $\sigma_{\dot{X}_{gi}}$ 는 각각  $X_{gi}$ ,  $\dot{X}_{gi}$ 의 표준편차를 나타낸다.

문헌 5, 20, 21 등에서 발표된 멕시코만 지역의 최대파고기록을 참조하여 본 논문에서는 폭풍의 발생시 최대파고조건( $H_{s, max}$ )의 분포는 대수정규분포로서 중앙값(median)이 38ft, 분산계수는 0.18로 가정하였고, 이러한 폭풍의 1년간 평균발생빈도는 0.017회 인것으로 가정하였다. 짐토층에 타설된 말뚝의 인발지지력과 관련하여 문헌 9, 10 등을 참조하여, 말뚝의 지지력도 대수정규분포로

가정하였다. 여기서는 말뚝지지력의 평균 및 분산 계수는 여러가지로 변화시키면서 결과를 분석하였다.

식(14)로써 하나의 폭풍에 대한 고정말뚝의 파괴확률을 구한후, 구조물이 설계시 계획한 사용수명동안에 파괴될 확률은 폭풍의 발생이 Poisson 과정에 따른다고 가정하여 다음과 같이 산정하였다.

$$P_{f(n)} = 1 - \exp(-n\lambda p_f) \quad (18)$$

여기서,  $n$  = 구조물의 사용수명(년);  $\lambda$  = 폭풍의 1년간 평균발생빈도이다.

### 5. 반복하중으로 인한 고정말뚝의 파괴확률

해양구조물의 인장말뚝의 지지력에 대한 반복하중의 영향은 최근에 많은 연구가 발표되고 있다. (10,11,12,13) 문헌 10은 말뚝의 길이 방향에 따라 지지력이 감소되는 과정을 보였으며, 문헌 12는 반복하중에 의하여 말뚝의 마찰지지력이 감소함을 보였다. 문헌 13은 비배수 조건하에서는 반복하중으로 인해서 말뚝주위에 과도한 공극수압이 축적된다고 발표하였다. 특히 문헌 12는 평균하중과 반복하중을 동시에 작용시켜 개발한 Cyclic Stability Diagram을 통해서 반복하중에 의하여 말뚝이 파괴되는 불안정영역(Unstable Zone)이 존재함을 보였고, 이로부터 그림 4와 같은 "피로곡선"을 개발하여 발표하였다.

본 논문에서는 반복하중과 관련된 말뚝의 신뢰도 해석에 있어서, 토질조건은 점토이고 폭풍의 작용시 비배수 상태가 유지되며, 또한 한 폭풍이 지속되는 동안에 발생한 말뚝 지지력의 손상도가 Miner의 손상법칙을 따라 누적된다고 가정하였다. 그림 4의 피로곡선들에 대하여 최소자승법을 써서 다음과 같이 수식화하였다.

$$N(A - a_0)^m = k, \quad A > a_0 \text{ and } N > 1 \quad (19)$$

여기서,  $A$  = 반복되는 하중폭의 말뚝지지력에 대한 비율( $A = S' = (S - S)/R$ );  $S$  = 말뚝에서 작용되는 평균 인발력;  $N$  = 파괴에 도달하는 하중반복의 횟수;  $a_0, m, k$  = 각각 상수로서 그림 4에서 처럼

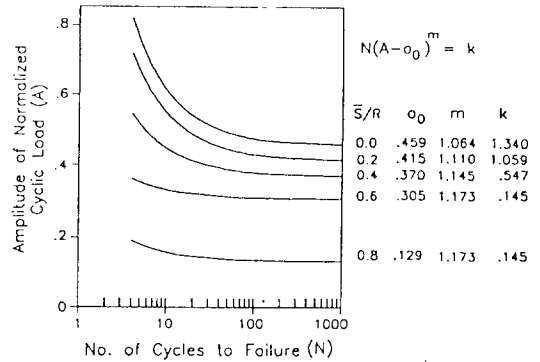


Fig. 4 Fatigue Curves for Driven Pile in Clay (source: Poulos, 1988)

말뚝의 평균인발력의 지지력에 대한 비율로 결정된다. 특히  $a_0$ 는  $A$ 의 한계치를 나타내는데, 이는 그 이하의 하중으로는 말뚝지지력에 손상을 줄 수 없음을 의미한다.

선형화된 구조계의 거동이 Narrow Banded 정규과정이라고 가정하면, 말뚝하중의 극치분포는 Rayleigh분포로 얻어질 수 있다. 그러면, 주어진 말뚝지지력( $r$ )과 폭풍의 파괴조건( $y$ )에 대한 고정말뚝의 누적손상도는 아래와 같이 산정된다.

$$D(r,y) = \int_0^{\infty} \frac{\nu_{oi} t_i f_{A_i}(a)}{N_i(a;r)} da = \frac{\nu_{oi} t_i}{\sigma_{S_i'}^2} \int_0^{\infty} \frac{a \exp\{-\frac{1}{2} (\frac{a}{\sigma_{S_i'}})^2\}}{N_i(a;r)} da \quad (20)$$

여기서,  $\nu_{oi} = i$  번째 파괴조건에서  $S_i'$ 의 평균 zero 통과율;  $t_i = i$  번째 파괴조건의 지속기간;  $\sigma_{S_i'} = S_i'$ 의 표준편차;  $N_i(a;r)$  = 식 (19)로 주어지는 파괴에 이르는 하중의 반복횟수;  $f_{A_i}(a) = A_i$  확률밀도함수(Rayleigh 분포)이다.

폭풍기간동안 말뚝의 손상도의 합은 각각의 파괴조건에 대한 누적손상도로 부터 아래와 같이 구해진다.

$$D_i(r,y) = \sum_{i=1}^I D_i(r,y) \quad (21)$$

식 (21)에서  $r$ 과  $y$ 는 확률변수로 나타내지므로, 폭풍이 발생시 말뚝손상의 기대값은 아래와 같이

구해진다.

$$\bar{D}_i = \int_0^\infty \int_0^\infty D_i(r;y) f_Y(y) f_R(r) dy dr \quad (22)$$

Palmgren-Miner의 가설에 근거하여, 말뚝의 평균피로수명( $T$ )을 1차의 근사해로서 다음과 같이 산정하였다.

$$\bar{T} = t_s / \bar{D}_i \quad (23)$$

문헌 24를 비롯한 많은 피로신뢰도 해석의 경우와 같이, 피로수명( $T$ )의 확률분포를 대수정규분포로 가정하여 반복하중에 대한 말뚝의 파괴확률을 다음과 같이 구하였다.

$$P_f^c = \text{Prob.}\{T < t_s\} = \Phi(-\beta) \quad (24)$$

$$\beta = (\lambda_T - \ell_n t_s) / \zeta_T = [\ln(\bar{T}/t_s) - 0.5\ln(1 + \rho_T^2)] / \sqrt{\ln(1 + \rho_T^2)} \quad (25)$$

여기서  $\Phi(\cdot)$  = 정규분포함수;  $\lambda_T, \zeta_T$  = 각각  $\ell_n(T)$ 의 평균과 표준편차;  $\rho_T = T$ 의 분산계수이다. 피로수명의 분산계수는 Miner 손상법칙의 불확실성( $\Delta$ ), 하중계산과정의 오차( $B$ ), 피로강도에 대한 불확실성( $N$ )등과 관련된다. 이들이 모두 대수정규분포를 따른다고 가정 할 때, 피로수명의 분산계수는 다음 관계식으로 나타내진다.

$$\sigma_{\ln T}^2 = \ell_n(1 + \rho_T^2) = \ell_n[(1 + \rho_\Delta^2)(1 + \rho_B^2)(1 + \rho_N^2)]^m \quad (26)$$

여기서  $\rho_\Delta \cdot \rho_B \cdot \rho_N \cdot \rho_T =$  각각  $\Delta, N, B$ 의 분산계수이다. 본 논문에서 식 (26)의  $m$ 값은 문헌 12의 피로곡선을 근거로 1.2로 취하였다. 피로수명의 분산계수와 관련된 여러 요소들의 분산계수들은 가용할 자료가 충분치 못하므로, 다음과 같이 취하였다:  $\rho_\Delta = 0.5, \rho_B = 0.3, \rho_N = 0.7-1$ . 위의  $\rho_\Delta$  및  $\rho_B$ 는 문헌 24, 25에 발표된, 원형 철제구조물의 경우와 유사히 택한 것이고,  $\rho_N$ 의 값은 그 경우보다 큰 값을 취한 것으로서, 향후 이 자료들의 타당성에 대한 연구가 계속되어야 할 것이다. 식 (26)으로 산출되는  $\rho_T$ 는 1.0-2.0의 범위였으므로, 여기서는 이 값을 여러가지로 변화시키면서

예제해석을 수행하였다.

폭풍의 발생이 Poisson 과정에 따른다고 볼 때, 구조물의 사용수명 동안에 말뚝이 파괴될 확률은 아래와 같이 구할 수 있다.

$$P_f^c(n) = 1 - \exp(-n\lambda P_f^c) \quad (27)$$

여기서  $n$  = 구조물의 사용수명(년);  $\lambda$  = 폭풍의 1년간 발생빈도이다.

### 6. 수치결과 및 검토

예제해석을 위하여, 멕시코만내의 수심이 1,000ft 되는 지점에 위치한 가상적인 Guyed Tower 를 고려하였다. 그림 1은 예제구조물의 형태 및 단순화한 구조해석모형을 보인 것인데, 여기서 Tower는 9개의 등가보요소로 구성된 하나의 기둥모델로 단순화시켰다. 계류선들은 평균수면 아래 50ft 지점에서 Tower와 60° 각도로 연결되었으며, 하단 해저면의 Clumpweight(총무게 350 kips가 120ft에 걸쳐 분포됨)와 연결되었다. 계류장치의 초기강도는 200 kips/ft로 산정되었다(그림 2). 해저지반에 타설된 고정말뚝은 직경 6ft, 길이 115ft 이며, Anchor선은 해저면으로부터 70ft 아래 지점에서 고정말뚝과 연결된다(그림 1). 계류선 시스템은 하나의 계류선이 파괴되더라도 구조물을 지지할 수 있는 여분의 강도를 갖지만, 본 논문에서는 파괴확률 산출시 고정말뚝들에 대한 체계파괴(System Failure)는 고려하지 않았다.

구조물의 자유진동해석 결과, 첫번째 고유진동의 주기는 26초로서, 이는 Tower의 해저면을 중심으로 하는 강체회전운동과 관련됨을 알 수 있다. 횡변형과 관련된 두번째 고유진동주기는 3초로 구해졌다. 따라서, Guyed Tower의 고유진동주기가 파랑의 에너지가 많이 집중된 주기(5~18초)를 충분히 피하여 설계됨을 알 수 있다. 3개의 자유진동모우드를 사용하여, 추계론적 선형화기법을 통한 주파수영역 해법으로 동적해석을 수행하였다. 그림 5는 파괴조건에 따른 계류점 변위의 평균( $\bar{x}_k$ )과 표준편차( $\sigma_{x_k}$ )값들을 보인 것이다. 여기서 평균변위는 설계파고조건( $H_s = 41ft$ )

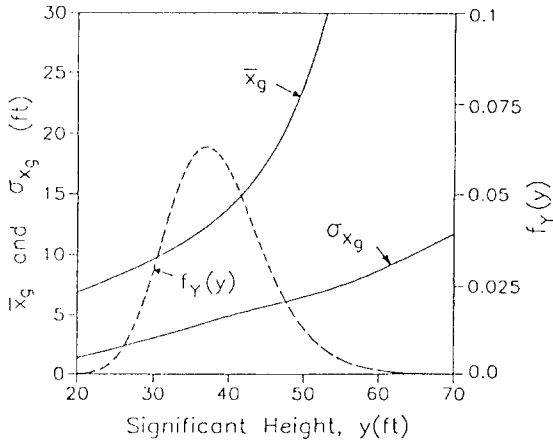


Fig. 5 Probability Distribution of Severe Storm and Response Statistics for the Storm

에 근접할수록 크게 증가하나, 동적성분과 관련된 표준편차는 파고조건에 따라 비교적 선형으로 증가함을 알 수 있다. 고정말뚝의 인발력은 그림 2에 보인 계류점의 변위와의 관계로부터 산출되었다.

멕시코만의 폭풍에 대한 통계적 해석결과를 근거로, 한 폭풍의 최대파고조건에 대한 확률분포 ( $f_Y(y)$ )는 그림 5에 보인 바와 같이 대수정규분포로서 중앙값이 38ft, 분산계수가 0.18로 가정하였으며, 폭풍의 1년간 평균 발생빈도는 0.017회인 것으로 하였다. 폭풍은 그림 3에 보인 바와 같이 일련의 여러 정상과정의 파고조건들로 구성되는 비정상 과정으로 모형화했다. 각각의 파고조건 기간은 1시간으로 가정하였으며, 폭풍의 총지속기간은 13시간으로 가정하였다. 각 파고조건에서 풍하중과 조류의 속도분포 등은 식(11)로 보인 풍속과 유의파고의 관계식으로부터 산정되었다.

고정말뚝의 지지력의 확률분포는 대수정규분포로 가정하였다. 문헌 14(API RP2A)의 설계지침은 말뚝의 극한지지력은 설계파고조건에 대한 최대하중에 대해서 2배 이상의 강도를 가지도록 규정하고 있다. 따라서 본 논문에서는 말뚝지지력의 평균값은 설계파고조건에 대해서 2~3의 안전도(Safety Factor: SF)를 갖도록 하였고, 말뚝지지력의 분산계수는 0.2~0.4의 범위<sup>(9,10)</sup>로 가정하여 연구를 수행하였다.

Table 1 Probabilities of Anchor Pile Failure for Extreme Loading due to Severe Storms

MEAN SAFETY FACTOR	$\rho_R$	$P_f$	$P_{f(1)}$	$P_{f(20)}$
2.0	0.2	6.10E-3	1.04E-4	2.08E-3
	0.3	1.82E-2	3.09E-4	6.15E-3
	0.4	5.33E-2	9.06E-4	1.80E-2
2.5	0.2	2.23E-3	3.80E-2	7.59E-4
	0.3	4.72E-3	7.79E-5	1.59E-3
	0.4	1.76E-2	2.82E-4	5.63E-3
3.0	0.2	9.28E-4	1.58E-5	3.15E-4
	0.3	1.77E-3	3.01E-5	6.03E-4
	0.4	9.97E-3	1.69E-4	3.38E-3

표 1은 고정말뚝의 여러 강도조건들에 따른 최대하중에 대한 파괴확률을 1년간 및 사용기간동안 안으로 분류하여 보인 것이다. 설계하중에 대한 말뚝지지력의 안전도가 2~3인 경우에 있어서, 1년간 파괴확률은  $10^{-3}$  이하로 나타났다. 멕시코만에 설치된 고정해양구조물들은 1년간 파괴확률이 대략  $10^{-3}$  정도로 발표된 바 있으며, 문헌 27에서는 공인된 설계기준에 따라 설계된 해양구조물의 1년간 파괴확률은  $10^{-3} \sim 10^{-5}$ 의 범위라고 발표된 바 있다. 이 결과들을 참조해볼 때, 본 논문의 가상의 Guyed Tower는 폭풍으로 인한 최대하중에 대해서 만족할만한 신뢰도를 갖춘 것으로 판단된다. 구조물의 사용기간이 20년인 경우에 고정말뚝의 사용기간동안의 파괴확률은 약  $10^{-2} \sim 10^{-4}$ 로 나타났다(표1).

반복하중을 받는 말뚝의 지지력감소로 인한 파괴모우드를 고려하기 위하여 피로수명의 개념이 도입되었다. 폭풍의 지속시간은 총 13시간으로 하여 고정말뚝의 누적손상도를 구하였다. 먼저 그림 4의 피로곡선을 사용하여 평균손상도를 구한 후, 폭풍에 대한 말뚝의 평균피로수명이 산정되었다. 피로수명의 분산계수는 Miner의 법칙, 하중계산, 피로강도등의 불확실성을 고려하여 1.0~2.0의 범위로 산출되었다. 표2는 반복하중에 대한 말뚝의 파괴모우드에 있어서, 하나의 폭풍에 대한 파괴확률( $P_f$ )과 구조물의 사용기간동안의 파괴확률( $P_f(20)$ )을 보인 것이다. 그림 6은 최대하중과 반복하중으로 인한 파괴확률들을 비교하여 보인 것이다. 전반적인 관점에서, 반복하중으로 인한



Table 2 Probabilities of Anchor Pile Failure for Cyclic Loading due to Severe Storms

MEAN SAFETY FACTOR	$\rho_R$	$\bar{D}_t$	$P_f$			$P_{f(20)}$		
			$\rho_T=1$	$\rho_T=1.5$	$\rho_T=2$	$\rho_T=1$	$\rho_T=1.5$	$\rho_T=2$
2.0	0.2	7.60E-3	2.70E-8	3.88E-5	6.60E-4	9.17E-9	1.32E-5	2.24E-4
	0.3	3.76E-2	2.14E-4	6.62E-3	2.56E-2	7.29E-5	2.25E-3	8.66E-3
	0.4	9.44E-2	7.92E-3	5.19E-2	1.11E-1	2.69E-3	1.75E-2	3.70E-2
2.5	0.2	1.97E-3	8.43E-13	1.03E-7	9.55E-6	2.87E-13	3.49E-8	3.25E-6
	0.3	7.60E-3	2.70E-8	3.88E-5	6.60E-4	9.17E-9	1.32E-5	2.24E-4
	0.4	3.12E-2	8.86E-5	4.01E-3	1.79E-2	3.01E-5	1.36E-3	6.06E-3
3.0	0.2	7.36E-4	-	5.35E-10	2.29E-7	-	1.82E-10	7.78E-8
	0.3	2.05E-3	1.21E-12	1.33E-7	1.12E-5	4.12E-13	4.52E-8	3.82E-6
	0.4	1.07E-2	2.53E-7	1.40E-4	1.65E-3	8.60E-8	4.77E-5	5.59E-4

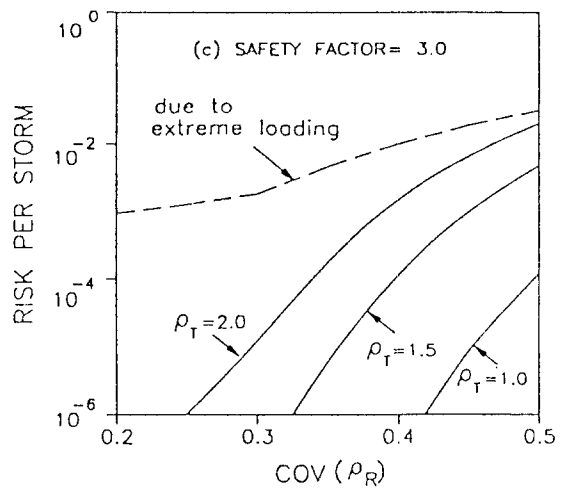
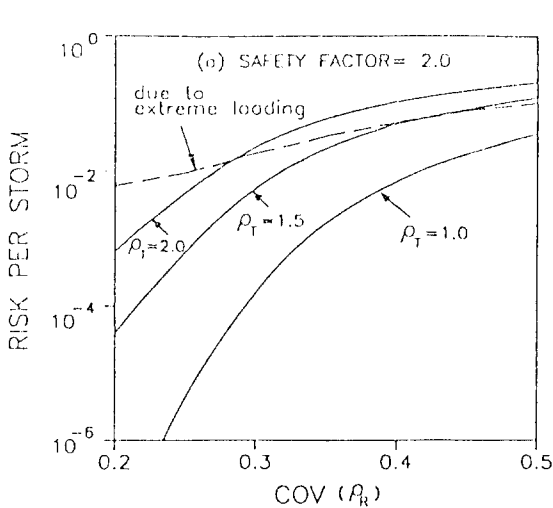
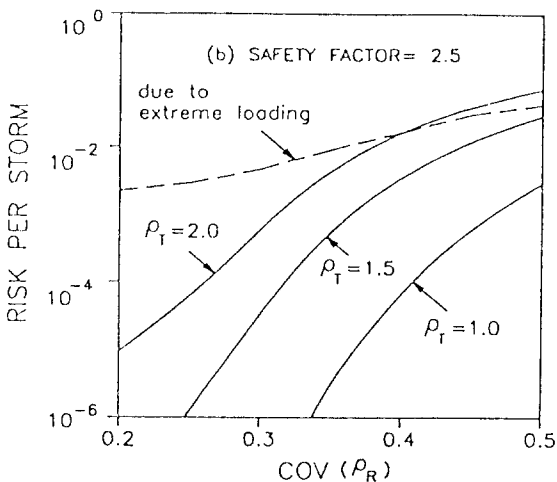


Fig. 6 Risk per Storm due to Cyclic Loading vs Strength Variability



파괴확률은 말뚝지지력의 안전도 및 분산계수, 그리고 피로수명의 분산계수 등에 따라 크게 변하였다. 안전도가 비교적 낮고( $S.F.=2\sim 2.5$ ), 지지력 및 피로수명의 분산계수들이 높을 경우는( $\rho_R > 0.3, \rho_T > 1.5$ ), 반복하중으로 인한 파괴확률은 최대 하중으로 인한 것과 같은 수준으로 나타났다. 그러나 안전도가 높고 말뚝의 강도의 불확실성이 낮은 경우는(즉  $S.F.=3, \rho_R < 0.35, \rho_T < 1.5$ ), 반복하중으로 인한 지지력의 감소효과는 상대적으로 큰 의미가 없는 것으로 나타났다. 그림 7은 폭풍의 지속기간에 따라, 전술한 두가지 파괴모우드에 대한 파괴확률을 보인 것이다. 폭풍의 지속기간이 길어져도 최대하중으로 인한 파괴확률은 별로 차이가 나지 않았으나, 반복하중으로 인한 파괴확

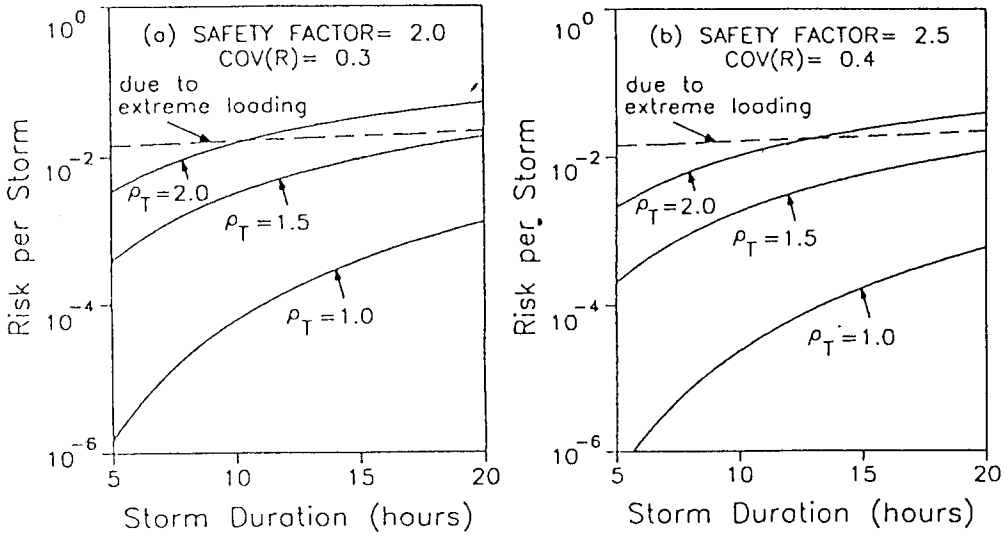


Fig. 7 Sensitivity of Risk due to Cycle Loading to Storm Duration

들은 꾸준히 증가하여 크게 변화하였다. 결론적으로, 말뚝의 지지력과 관련된 불확실성들은 클 것으로 예상되기 때문에, 반복하중으로 인한 고정 말뚝의 지지력의 감소는 Guyed Tower의 신뢰도 해석상 중요한 요소가 될 것으로 판단된다. 따라서 말뚝의 지지력, 피로강도 등의 불확실성에 대한 지속적인 연구가 요망된다.

5. 결론

본 논문에서는 폭풍의 작용시 고정말뚝의 파괴에 주안점을 둔 해양 Guyed Tower의 신뢰도해석 방법에 대하여 연구하였다. 최대하중과 반복하중으로 인한 고정말뚝의 파괴조건들에 대하여 신뢰도해석 방법을 개발하였다. 가상적 구조물에 대한 예제해석결과, 반복하중으로 인한 파괴확률은, 말뚝지지력의 안전도가 낮고 강도에 대한 불확실성이 큰 경우에, 최대하중으로 인한 파괴확률과 같은 수준으로 되어, 신뢰도해석시 주요한 인자임을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구의 수행중 말뚝의 피로파괴구조에 관하여 이론적 검토와 조언을 하여주신 한국건설기술 연구원의 이명환 박사님과 고려대학교의 이인모

교수님께 감사를 표합니다.

REFERENCES

1. Mous, L.D., Finn, Ld., Turner, J.W., "Development of the Guyed Tower," Soc.Pet.Eng.J., AIME, APR.1985.
2. Mangiacavacchi, A., Abbott, P.A., Hanna, S.Y., Suhendra, R., "Design Criteria of a Pile Founded Guyed Tower," Proc.Offshore Tech.Conf., Paper OTC3882, Houston, 1980.
3. Glasscock, M.S., Turner, J.W., Finn, L.D., Pike, P.J., "Design of the Lena Guyed Tower," Proc.Offshore Tech.Conf., Paper OTC4653, Houston, 1984.
4. Bea, R.G., "Reliability Considerations in Offshore Platform Criteria," J.Struc.Div., ASCE, 1980, 106(ST9).
5. Anderson, W.D., Silbert, M.N., Lloyed, J.R., "Reliability Procedure for Fixed Offshore Platforms," J.Struc.Div., ASCE, 1982, 108(ST11)
6. Prucz, Z., Soong, T.T., "Reliability and Safety of Tension Leg Platforms," Engineering Structures, APR.1984, 6.
7. Bjerager, P., Loseth, R., Winterstein, S.R., Cornell, C.A., "Reliability Method for Marine

- Structres under Multiple Environmental Load Processes," Proc.5th Int.Conf.Behaviour of Off-Shore Structures, AUG.1988.
8. Choi, H.S., HA, T.B., "Risk Assessment of Anchor Pullout of a Guyed Tower," Proc. US-Korea Joint Seminar/Work-Shop on CRITICAL ENGINEERING SYSTEM, Seoul, Koera, May 1987.
  9. Dennis, N.D., Olson, R.E., "Axial Capacity of Steel Pipe Pils in Clay." ASCE Spec. Couf.on Geot.Practice in offshore Eng., Austin, Texas, 1983.
  10. Bea, R.G., Dover, A.R., Audibert, J.M.E., "Pile Foundation Design Considerations for Deep Water Fixed Structures," Proc. 3rd Int Conf. Behaviour of Off-Shore Structures, Cambridge.Mass., 1982.
  11. Matlock, H., Bogard, D., Cheong, L., "A Laboratory Study of Axially Loaded Piles and Pile Groups Including Pore Pressure Measurements," Proc.3rd Int.Conf. Behaviour of Off-Shore Structures, Cambridge.Mass., 1982.
  12. Poulos, H.G., "Cyclic Stability Diagram for Axially Loaded Piles," J. Geot.Eng., ASCE, 1988, 114(8).
  13. Malek, A.M., Azzouz, A.S., Baligh, M.M., Germaine, J.T., "Behavior of Foundation Clays Supporting Compliant Offshore Structures," J.Geot. Eng., ASCE, 1980, 115(5).
  14. American Petroleum Institute, "Planning, Designing, and Constructing Fixed Offshore Platforms." API RP.2A, 1984, 15th ed.
  15. Mo, O., Moan, T., "Environmental Load Effect Analysis of Guyed Towers," Proc. 3rd Int. Offshore Mech. and Arctic Eng. Symposium, ASME, Louisiana, Feb.1984.
  16. Leonard, J.W., Young, R.A., "Coupled Response of Compliant Offshore Platforms," Eng. Structures, APR.1985, 7.
  17. Smith, E., Sigbjornsson, R., "Nonlinear Stochastic Analysis of Compliant Platforms" Proc. Offshore Tech.Conf., Paper OTC3801, Houston, 1980.
  18. Brynjolfsson, S., Leonard, J.W., "Response of Guyed Offshore Towers to Stochastic Loads: Time Domain vs Frequency Domain," Eng. Structures, APR.1988, 10.
  19. 류정선, 윤정방, "랜덤파랑하중에 대한 Guyed Tower의 동적 기동해석," 한국해양공학회지, 제1권 제1호, 1987.
  20. Hamilton, R.C., Ward, E.G., "Ocean Data Gathering Program-Quality and Reduction of Data," Proc.Offshore Tech. Conf., Paper OTC2 108-A, Houston, 1974.
  21. Haring, R.E., Heideman, J.C., "Gulf of Mexico Rare Wave Return Periods," Proc. Offshore Tech Conf., Paper OTC3230, Houston, 1978.
  22. Chakrabarti, S.K., Hydrodynamics of Offshore Structures, Computational Mech. Pub., 1987.
  23. Crandall, S.H., "First-Crossing Probabilities of the Linear Oscillator," J.Sound Vib., 1970,12 (3).
  24. Wirsching, P.H. and Chen, Y-N., "Considerations of Probability-Based Fatigue Design for Marine Structures," Marine Structural Reliability Symposium, SNAME, Arlington, OTC.1987.
  25. Wirsching, P.H., "Probability Based Fatigue Design Criteria for Offshore Structures," Final Report. American Petroleum Institute, PRAC Project 80-15, 1981.
  26. Davenport, A.G., "Note on the Distribution of the Largest Value of a Random Function with Application to Gust Loading," Proc.Inst.Civ. Eng., 1964, 28.
  27. Field, S., "Reliability of offshore Structures," J.Pet.Tech., Trans.AIME, OCT.1978.

(접수일자 : 1991.7.12)