한국전산구조공학회
1998년도 봄학술발표회 논문집

강관말뚝식 계류돌핀의 수치적 설계최적화

Numerical Design Optimization of Mooring Dolphin of Steel Pile Type

이 나 리* 류 연 선** 김 정 태** 서 경 민***
Lee, Nary Ryu, Yeon-Sun Kim, Jeong-Tae Seo, Kyung-Min

ABSTRACT

Optimum design of mooring dolphin is numerically investigated. Design optimization problem of mooring dolphin is first formulated. Geometry and cross sections of piles are used as design variables. Design objective is the total weight of steel piles of mooring dolphin, and the constraints of stress, penetration depth, lower and upper bounds on design variables are imposed. Based on the design variable linking and fixing, several class of design variations are sought. For the numerical optimization, both PLBA(Pshenichny-Lim-Belegundu-Arora) program and DNCONF subroutine code in IMSL library are used. For a dolphin with 20 steel piles, vertical and inclined, optimum designs for different cases are successfully obtained, which can be applied for the mooring of a large floating structure.

1. 서 론

계류돌핀구조물은 평상시에는 선박의 접안을 가능하게 하고 대형 부유구조물의 위치를 유지하며, 이상시에는 외력에 대해서 충분히 안전한 계류를 하고 접안할 수 있도록 한다. 100년 주기 이상의 태풍을 고려하는 경우, 대형의 해양구조물에 작용하는 계류력이 과대하지 않고 파괴에 대해 안전성이 높은 돌핀링크방식이 적합하다. 1970년대에 일본 토목시공설계위원회에서 돌핀링크방식 들 중 수평하중에 대해 충분한 강도를 갖고 변위량이 작은 방식은 말뚝식 돌핀임을 입증한 이래 우리나라에서도 이에 대한 연구는 활발히 진행되어 오고 있다[6][8].

기존의 계류돌핀시스템의 설계과정은 과대안정으로 인한 비경제적인 설계의 우려, 치수 결정의 어려움에 의한 과다한 시간낭비등의 문제점이 있다. 따라서, 이러한 비효율성을 해결하기 위해서 수치적 최적화기법을 계류돌핀시스템의 설계과정에 도입하여야 한다. 말뚝식 계류돌핀구조물은 외력을 하부구조에 전달하는 상부구조와 이를 지지하는 수직말뚝 및 경사말뚝의 하부강관말뚝으로 구성되어 있다. 본 연구에서는 강관말뚝식 계류돌핀의 수치적 최적설계를 위해 하부강관말뚝의 평균직경과 강관두께, 경사말뚝의 타입각등을 설계변수로 설정한다. 강관말뚝의 총 중량을 최소화할 목적함수로 두며, 제약조건으로는 응력, 전체좌굴, 인발 및 연직지지력, 설계변수의 상·하한등을 고려한다.

* 부경대학교 해양공학과 조교
** 부경대학교 해양공학과 교수
*** 동해전문대학 토목과 교수

강관말뚝식 계류돌핀의 최적설계를 위한 수치적 최적화기법으로는 공학최적설계문제에서 많이 사용되고 있으며 효율성과 강력함이 입증된 순차이차계획법(Sequential Quadratic Programming method ; SQP)을 사용한다. 최적설계프로그램은 수렴속도가 높고 계산량이 비교적 적은 PLBA(Pshenichny - Lim - Belegundu - Arora)알고리즘과 대부분의 전자계산소에서 사용가능한 IMSL 라이브러리를 사용한다. 수치예를 설정하여 설계문제를 정식화하고 수치적 최적화기법을 사용하여, 하중조건에 따른 강관말뚝식 계류돌핀의 최적설계를 도출함으로써 설계문제의 정식화와 설계최적화 과정의 유효성을 확인하는 것이 본 연구의 목적이다.

2. 계류돌핀의 설계

2.1 설계외력의 산정

계류돌핀 구조물에 작용하는 하중으로서는 풍압력, 파력, 조류력, 지진력, 정수압, 선박의 접안력이나 계류력 등을 생각할 수 있다. 그리고, 계류되어야 할 부유구조물의 자중 및 상재하중 등의 장기간 고정되는 설비의 중량으로 구조물 자체의 중량을 고려한다[4]. 재현기간 100년의 최대풍속(50m/s)을 사용하여 ABS 규준에 따라 식(2.1)로 풍압력을 계산한다[7][8].

$$F_W = 0.0623\, U^2 C_s C_h A \tag{2.1}$$

파력은 항력과 관성력의 합으로 Morison식 (2.2)에 의해 계산된다[7].

$$F_P = F_i + F_d = \rho C_m V \frac{du}{dt} + \frac{1}{2}\rho C_D A u|u| \tag{2.2}$$

조류력은 관측치로부터 얻은 최대조류속도를 사용하여 식(2.3)와 같이 산정한다[6].

$$F_C = \frac{1}{2}\rho C_{DC} A |V_C| V_C \tag{2.3}$$

실제부유구조물은 탄성체이므로 탄성 처짐을 고려하면 계류력이 불균일하게 되므로, 본 연구에서는 부유구조물을 강체로 보고 계류력이 균일하게 분포하도록 가정한다. 계류돌핀에 작용하는 계류력의 계산은 대형부유구조물의 크기와 대형구조물에 연결되는 계류돌핀의 전체갯수에 따라 달라진다. 접안시 또는 계류시 선박에 의해서 작용하는 외력은 식(2.4)로 계산된다[9].

$$F_M = [W_s V^2/(2g)] \times C_e \times C_{vm} \times C_s \times C_c \quad (t \cdot m) \tag{2.4}$$

2.2 상부구조부

계류돌핀의 상부구조부는 대형부유구조물과 링크로 연결되어 하부강관말뚝에 수평력을 전달한다. 상부구조에 의한 강관말뚝의 설계외력을 산정할 때는 구조물 자체의 자중과 적재하중, 활하중 등을 고려하여 연직력을 계산한다.

2.3 하부강관말뚝

계류돌핀의 하부강관말뚝을 설계할 때 고려하는 하중으로는 상부구조에서 전달되는 축압축력, 축인장력, 수평력 및 휨모멘트가 있다. 허용응력설계법에서 압축력은 허용지지력을 넘지 않아야 하며, 장기간 지속하중에 대해 각각의 말뚝에 균등한 하중을 받도록 말뚝을 배치한다. 말뚝의 좌굴 계산시, 지표면에서 어떤 깊이까지의 가상고정점을 설정하여 모멘트, 축력등을 계산한다. 말뚝에 작용하는 수평반력은 식(2.5)로 계산된다.

$$F_{iH} = \frac{F_M}{n} + F_{iW} + F_{iP} + F_{iC} \tag{2.5}$$

여기서, F_{iH}는 i번째 말뚝의 수평반력, F_M은 계류돌핀에 작용하는 계류력, n은 말뚝의 개수, F_{iW}는 말뚝에 작용하는 풍압력, F_{iP}는 파압력, F_{iC}는 조류력이다.

(1) 축방향 압축력

강관말뚝에 작용하는 설계외력으로 축방향 압축력이 작용할 때 말뚝단면에 응력이 발생한다.

$$\sigma_c = \frac{P}{A_e} \tag{2.6}$$

(2) 축방향 인발력

말뚝에 축방향 인장력이 작용할 때, 말뚝에 발생하는 최대인발력(R_{ut})을 넘지 않도록 설계한다.

$$R_{ut}=\frac{\overline{N}A_s}{5} \quad (\text{사질토}) \tag{2.7}$$

$$R_{ut}=\overline{C_a}A_s \quad (\text{점성토}) \tag{2.8}$$

(3) 휨모멘트

굽힘모멘트에 의해 말뚝에 발생하는 휨응력은 허용굽힘응력을 초과하지 않도록 설계한다.

$$\sigma_b=\frac{M}{Z} \tag{2.9}$$

(4) 축방향 압축력과 휨모멘트

압축력과 휨모멘트를 동시에 작용하는 합성력에 대해서 식(2.10)이 만족되도록 설계한다[6].

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_{ca}}+\frac{\sigma_b}{\sigma_{ba}}\le 1.0 \tag{2.10}$$

(5) 연직지지력

말뚝의 연직지지력에는 식(2.11)을 만족하도록 설계한다. 강관말뚝의 폐단효과를 고려하여 선단지지력(Q_p)은 80%만 고려한다[5][8][10].

$$\frac{Q_a}{Q_u}\le F_s \tag{2.11}$$

$$Q_u=Q_p+Q_s=q_pA_p+f_sA_s=400N\frac{L_b}{D}A_p+\frac{\overline{N}}{5}A_{1S}+CA_{2S} \tag{2.12}$$

(6) 수평변위

말뚝머리부의 수평변위는 상부구조물의 사용상 요구되는 허용변위량을 초과하지 않아야 한다. 수평하중을 지지하는 말뚝의 거동을 평가하는 방법들 중에서 Chang의 방법을 사용하여 공식화된 식(2.13)에 의해 지표면에서의 말뚝의 변위가 계산된다[5][10].

$$y_o=\frac{1+\beta h}{4EI\beta^3}T \tag{2.13}$$

3. 최적설계문제

3.1 정식화 과정

계류돌핀의 최적설계문제에서 설계변수는 하부강관말뚝의 평균직경과 두께, 경사말뚝의 타입각 등으로 생각할 수 있다. 최소화 할 목적함수는 강관 말뚝의 전체 중량, 혹은 계류돌핀의 전체중량 등으로 생각한다. 제약함수는 응력에 대한 제약조건과 지지력에 대한 제약조건, 수평변위에 대한 제약조건, 설계변수제약조건 등으로 정의된다.

(1) 축방향 압축력에 대한 제약조건

$$\frac{P}{A_e\cdot\sigma_{ca}}\le 1.0 \tag{3.1}$$

$$P=F_B\cos\theta+F_{iH}\sin\theta \tag{3.2}$$

(2) 축방향 인발력에 대한 제약조건

$$\frac{P}{\frac{\overline{N}A_{1S}}{5}+\overline{C_a}A_{2S}}\le 1.0 \tag{3.3}$$

(3) 휨모멘트에 대한 제약조건

$$\frac{M}{Z\cdot\sigma_{ba}}\le 1.0 \tag{3.4}$$

$$M=\frac{F_M}{n}(a+\ell_o)+F_{iW}(b+\ell_o)+(F_{iP}+F_{iC})(c+\ell_o)+F_B(a+\ell_o)\tan\theta \tag{3.5}$$

여기서, a는 가상고정점에서 계류력이 작용하는 지점까지의 거리, b는 가상고정점에서 풍압력의 작용점까지

의 거리, c는 가상고정점에서 파력과 조류력의 작용점까지의 거리, F_B는 말뚝에 작용하는 연직력이다.

(4) 전체좌굴에 대한 제약조건

$$\frac{P}{A_e \cdot \sigma_{ca}} + \frac{M}{Z \cdot \sigma_{ba}} \leq 1.0 \tag{3.6}$$

(5) 연직지지력에 대한 제약조건

$$\frac{P \cdot F_s}{\left[0.8(40N\frac{L_b}{D}A_p) + \frac{\overline{N}}{5}A_{1S} + CA_{2S}\right]} \leq 1.0 \tag{3.7}$$

(6) 말뚝머리의 수평변위에 대한 제약조건

$$\frac{\left|\frac{(1+\beta h)}{4EI\beta^3} \cdot T\right|}{y_a} \leq 1.0 \tag{3.8}$$

(7) 설계변수 제약조건

$$D_L \leq D \leq D_U \tag{3.9}$$

$$\theta_L \leq \theta \leq \theta_U \tag{3.10}$$

$$t_L \leq t \leq t_U \tag{3.11}$$

$$t \leq \frac{D}{20} \tag{3.12}$$

여기서, D_L, D_U는 평균직경의 하한과 상한, t_L, t_U는 두께의 하한과 상한, θ_L, θ_U는 타입각도의 하한과 상한이다. 계류돌핀의 최적설계문제는 식(3.1)~(3.12)에서 제시한 부등호제약조건을 모두 만족하면서 목적함수를 최소화하는 설계변수를 결정하는 것으로 정식화할 수 있다.

3.2 최적화기법

구조최적설계는 구조해석(structural analysis), 설계민감도해석(design sensitivity analysis), 설계최적화(design optimization)의 세 과정으로 구분한다. 설계최적화 과정에서 이용되는 수치적 최적화 기법에서는 탐색방향(search direction)을 결정하기 위해 부문제(subproblem)를 구성한다. 결정된 탐색방향으로의 이동거리(step size)를 구하기 위해서는 주로 1차원 탐색을 하며 구조해석이 반복해서 수행된다. 수치 최적화기법들 중에서 효율적이고 강력함이 입증된 SQP법을 선택한다. 본 연구에서는 수렴속도가 높으며 활성제약조건식만을 사용하여 매 반복횟수에서의 계산량이 비교적 적은 PLBA 알고리즘과 대부분의 전자계산소에서 사용가능한 IMSL 라이브러리를 사용한다.

3.3 계류돌핀의 설계최적화 과정

지금까지 강관 말뚝식 계류돌핀을 설계할 때 최적화기법을 적용한 예가 없었다. 그러므로, 앞에서 제시한 설계최적화 과정을 단계별로 요약하면 Fig. 4.1과 같이 나타낼 수 있다.

1단계 : 계류돌핀 구조물의 외형, 주변 환경, 세부구조를 기술한다.

2단계 : 자연조건과 토질조건, 지질조건, 외력조건 등의 설계자료를 수집한다.

3단계 : 계류돌핀을 설계할 때 구하고자 하는 설계변수를 결정한다. 설계변수는 강관말뚝의 단면과 경사말뚝의 타입각도 등으로 생각할 수 있다.

4단계 : 3단계에서 결정된 설계변수에 관한 목적함수를 정식화한다. 목적함수는 돌핀 전체의 중량 또는 하부강관말뚝의 중량 등을 생각할 수 있다.

5단계 : 목적함수를 최소화하면서 설계변수를 찾기 위한 기준이 되는 제약조건을 정식화한다. 제약함수는 주로 하부강관말뚝에 대한 제약으로서 축방향 압축력, 축방향 인발력, 휨모멘트, 전체좌굴, 연직지지력, 말뚝머리의 수평변위, 설계변수 제약조건 등이 있다.

6단계 : 강관말뚝의 평균직경, 두께, 경사말뚝의 타입각도 등으로 설정된 설계변수의 초기치를 결정한다.

7단계 : 주어진 설계자료를 가지고 최적화 기법을 적용하여 최적설계를 한다.

8단계 : 모든 제약조건을 만족한다면 그때가 최적해가 된다. 제약조건에 위배된다면 9단계로 간다.

9단계 : 현 설계값에 증분량을 더한 새로운 설계값으로 7단계로 가서 다시 설계를 반복한다.

4. 수치예제

4.1 20개의 말뚝을 가진 계류돌핀

본 연구에서는 돌핀링크방식들 중에서 큰 수평하중에 대해서 충분한 강도를 가지고, 경제적이고 실제 적용된 20개의 수직 및 경사말뚝을 가진 강관말뚝식 계류돌핀 구조물을 수치예로 설정하였다. 상부구조의 재료는 무근콘크리트로 가정하고, 하부강관말뚝은 KSD 3566 일반구조용 탄소강관 제 2종 SPS 41을 사용한다고 가정한다. 강관말뚝은 4개의 수직말뚝과 16개의 경사말뚝으로 구성되어 전체 20개의 말뚝이 상부콘크리트 하부에 X축과 Y축에 대해 대칭으로 배열되어 있다. Fig. 4.2는 계류돌핀의 평면도로서 상부콘크리트 구조의 크기를 50m×16m×3m로 하였다. 상부콘크리트 구조물에 배열된 No. 1~4는 수직말뚝이고 나머지는 경사말뚝이다. Fig. 4.3은 계류돌핀의 정면도를 나타낸다. 대형부유구조물과 상부콘크리트를 연결하는 링크가 2지점에 각각 위치한다. Fig. 4.4는 대형부유구조물에 계류된 돌핀의 측면도이다.

4.2 설계변수 연계 및 고정

본 연구에서는 수직 및 경사말뚝의 단면이 서로 다른 경우와 같은 경우, 경사말뚝의 타입각을 고정하는 경우등을 설계변수로 하였다. 이와 같이 4가지 경우에 따라서 설계변수를 정의한 것이 Table 4.1에 요약되어 있다.

4.3 예제의 정식화

정식화하기 위해서 사용된 설계자료는 Table 4.2에 요약된 자연조건과 Table 4.3에 요약된 토질자료를 이용하였다. 자연조건은 재현기간을 100년 태풍시로 가정한다. 계류돌핀 구조물에 작용하는 설계외력이 X방향으로 작용할 때와 Y방향으로 작용할 때를 모두 고려해야 하므로, 주어진 자연조건과 토질조건을 가지고 X방향과 Y방향으로 작용하는 설계외력을 산정하였다. 상부콘크리트 구조부는 5640톤의 자중만을 고려하여 각 말뚝에 등분포로 작용하도록 하였다. 풍압력은 식(2.1)에서 제시된 식을 사용하여 계산하였다. 파력은 파장을 구한 다음 수심 5m 마다의 파입자 속도과 가속도를 구하여 평균한 값을 식(2.2)에 대입하여 구하였다. 조류력은 최대조류유속을 사용하여 식(2.3)에 의해 계산되었다. 계류력은 접안시 또는 계류시 선박의 용량이나 대형부유구조물의 규모를 고려하여 식(2.4)에 의해 계산되지만 본 연구에서는 X방향으로 300톤, Y방향으로 1000톤이 작용한다고 가정하고 산정하였다.

최소화할 목적함수는 하부강관말뚝의 총중량으로 하였으며, X 및 Y방향 모두 만족해야할 제약조건은 축방향 압축력과 휨모멘트에 대한 제약, 축방향 인발력에 대한 제약, 연직지지력에 대한 제약, 설계변수의 상·하한 등을 고려하였다. 상부콘크리트구조의 크기를 고려하여 강관말뚝 평균직경의 하한은 0.5m, 상한은 5.0m로 하였다. 강관말뚝 두께의 하한은 0.0001m, 상한은 1.0m으로 하였고, 경사말뚝의 타입각에 대한 하한은 1° 이고 상한은 40° 로 하였다. 지금까지의 과정으로 수치예제의 최적화문제를 네 경우의 설계변수에 대해서 정식화하였다.

4.4 최적화 프로그램

정식화된 최적설계문제의 최적해를 얻기 위해 PLBA와 IMSL 라이브러리를 이용하여 최적설계를 수행하였다. PLBA는 사용자가 4개의 서브루틴을 작성하여야 한다. 본 연구의 수치 예제에서는 벌칙매개변수 1.0, 활성화 제약조건식의 폭을 0.1, 최적해의 정확도를 1.0×10^{-2}, 선탐색의 정확도를 1.0×10^{-3}으로 선택하여 최적설계를 수행하였다. 그리고, IMSL 라이브러리의 DNCONF 서브루틴과 목적함수와 제약함수를 정의해주는 서브루틴을 작성하여 최적설계를 하였다.

4.5 해석결과 및 고찰

4.2절에서 제시된 네 경우의 설계변수에 관해서 PLBA를 수행한 결과를 Table 4.4와 Table 4.5에 요약하였다. 그리고, IMSL을 수행한 결과를 Table 4.6과 Table 4.7에 요약하였다. 같은 초기치와 입력자료를 가지고 수행하였지만 수렴성 있는 PLBA에서 Case 1과 Case 2는 결과를 얻지 못하였다. Table 4.4와 Table 4.5의 Case 1과 Case 2는 초기입력자료 중 최적해의 정확도를 1.0×10^{-1}로 했을때의 결과이다. Table 4.5는

Table 4.4에서 얻은 결과를 다시 초기치로 하고 수행했을 때 얻은 결과이다. 네 경우 모두 최적해에 수렴되었음을 알 수 있다. 그리고, 이 외에도 Table과 다른 초기치로 수행했을때의 최적해는 Table과는 약간 다른 해를 얻었다. IMSL은 설계변수의 초기치만을 변경시켜가며 결과를 얻었다. Table 4.6은 동일한 초기치를 주었을 때 얻은 결과이고, Table 4.7은 Table 4.6에서 얻은 결과를 초기치로 해서 얻은 최적해이다. 여기서, Case 2는 해에 수렴하지만, 나머지는 다른 최적해를 산출하였음을 알 수 있다. 이 외에도 다른 초기치로 수행하였을 때 Table과는 다른 최적해를 얻었다. 따라서, 20개 말뚝을 가진 계류돌핀의 설계문제는 초기치를 변경하면서 수행하여 얻은 결과들로부터 여러개의 국부최소(local minimum)가 존재함을 알수 있다. 즉, 다중해(multiple solution)를 갖는 설계문제임을 짐작할수 있다.

일반적으로 설계변수의 개수가 많아질수록 목적함수인 강관말뚝의 총중량이 작아짐을 알 수 있었다. Case 1과 Case 3은 경사말뚝의 타입각도가 하한값에 수렴하여 수직말뚝식 계류돌핀구조물로 설계되었다. 다른 두 경우(Case 2, Case 4)는 경사말뚝의 타입각도를 20° 로 고정시켰기 때문에, 경사말뚝식 계류돌핀 구조물로 최적설계되었다. Case 1과 Case 3은 IMSL에서 더 작은 중량을 산출하였고 Case 2와 Case 4는 PLBA에서 더 작은 중량을 산출하였다.

본 연구에서는 설계문제를 PLBA와 IMSL만을 수행하여 결과를 얻었지만 수렴성 있는 PLBA가 수렴하지 않은 경우도 있기 때문에 여러개의 알고리즘을 사용할 필요가 있다.

5. 요약 및 결론

지금까지 계류돌핀의 설계문제는 최적화 기법을 적용하여 설계한 예가 없었기 때문에, 본 연구에서는 20개의 강관말뚝을 가진 계류돌핀을 수치예제로 설정하여 하부강관말뚝의 평균직경과 두께, 경사말뚝의 타입각도를 네 종류의 설계변수에 관해서 정식화하고 수치최적화 기법을 적용하였다. 말뚝식 계류돌핀구조물은 하부강관말뚝의 단면과 경사말뚝의 타입각을 설계변수로 하였다. 수직말뚝과 경사말뚝의 단면이 동일한 경우와 다른 경우, 경사말뚝의 타입각을 고정시킨 경우를 고려하여 최적해를 구하였다.

최적화기법은 순차이차계획법을 이용한 PLBA 프로그램과 IMSL을 수행하여 최적해를 산출하였다. 설계변수의 네가지 경우 중에서 경사말뚝의 타입각도를 설계변수로 한 두 경우(Case 1, Case 3)는 수직말뚝식 계류돌핀으로 최적해가 산출되었고, 다른 두 경우(Case 2, Case 4)는 경사말뚝의 타입각도를 20° 로 고정시키고 최적해를 산출하였다. 그 결과, 수치예로 선정된 20개의 말뚝을 가진 계류돌핀의 설계문제는 여러개의 국부 최소가 존재하였다. 이와 같은 과정으로 자연조건이나 외력조건이 다른 설치 해역에서도 강관말뚝식 계류돌핀구조물을 정식화하고 수치최적화 기법을 도입하면 최적 설계를 산출할 수가 있다.

참 고 문 헌

[1] Arora, J. S.(1989) : Introduction to optimum design, McGraw-Hill.

[2] Arora, J. S. and Ryu, Y.S.(1983) : A user's manual for the computer program DOCS ; Level 2.5, Tech. Rept. CAD-SS-82.1, Design Optimization Laboratory, College of Engineering, The University of Iowa

[3] Haug, E.J. and Arora, J.S.(1979) : Applied Optimum Design, John Wiley & Sons.

[4] Hiroshi Seki(1996) : 海洋構造物의 設計와 施工, 歐美書館

[5] POSCO(1994) : 鋼管말뚝의 設計와 施工, 삼양문화사

[6] 과학기술처(1996) : 부유식 해양구조물에 관한 연구

[7] 이재신(1989) : 海洋構造物 設計槪要, 원광출판사.

[8] 土木施工設計計算例委員會 : 港灣·海洋構造物の設計計算例, 山海堂

[9] 海運港灣廳(1993) : 港灣施設物 設計基準書(上·下)

[10] 건설교통부 : 도로교 표준 시방서

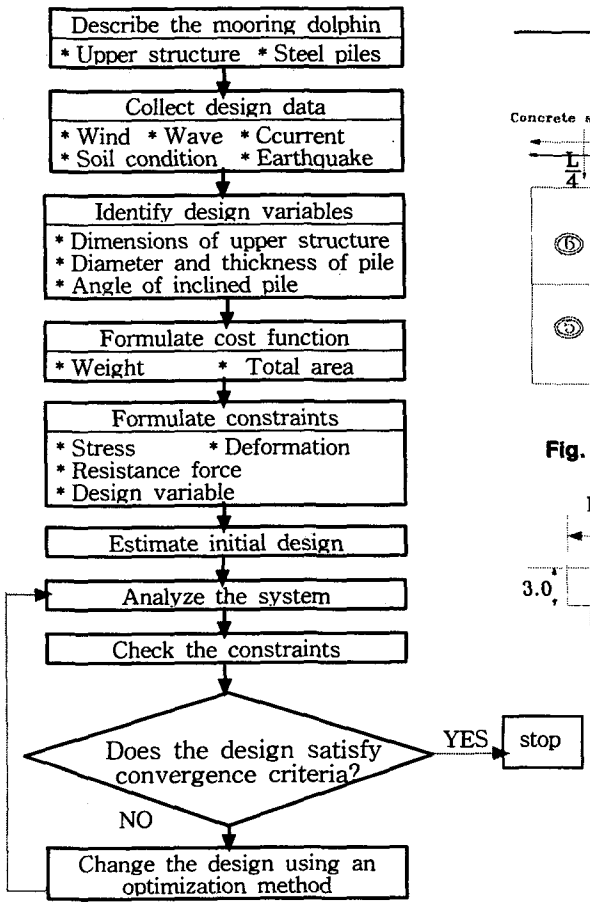

Fig. 4.1 **Flow chart for design optimization of mooring dolphin**

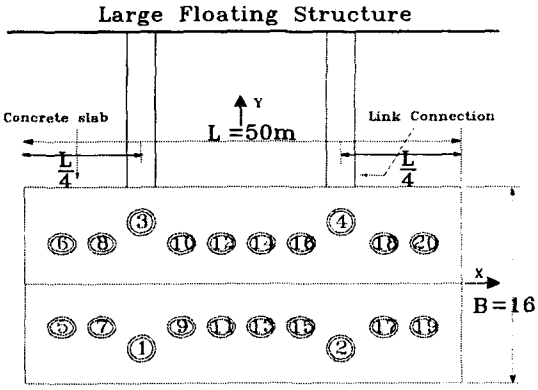

Fig. 4.2 **Plan view and pile numbering.**

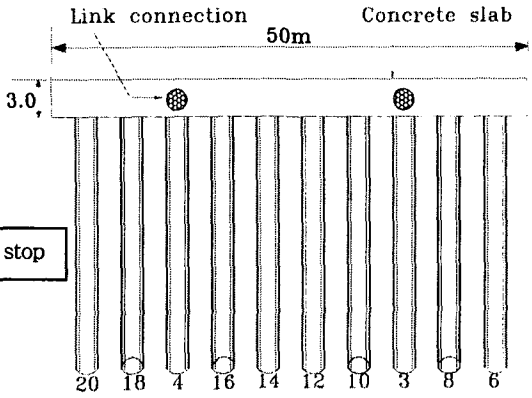

Fig. 4.3 **Front view (Y-direction) of mooring dolphin.**

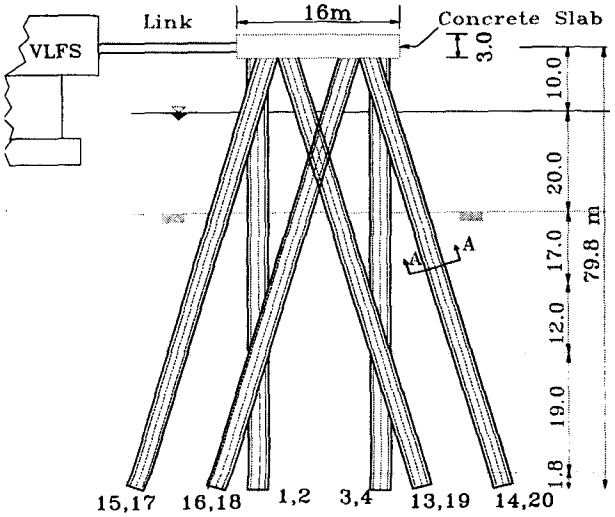

Fig. 4.4 **Side view (X-direction) of mooring dolphin.**

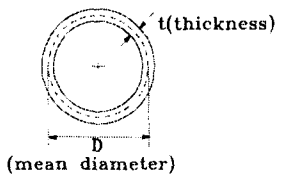

Fig. 4.5 **Cross section A-A of circular steel pile.**

Table 4.1 Definition of design variables

design variable	case 1	case 2	case 3	case 4
mean diameter of vertical pile (D_1)	x_1	x_1	x_1	x_1
thickness of vertical pile (t_1)	x_2	x_2	x_2	x_2
mean diameter of inclined pile (D_2)	x_3	x_3	linking ($=x_1$)	linking ($=x_1$)
thickness of inclined pile (t_2)	x_4	x_4	linking ($=x_2$)	linking ($=x_2$)
angle of inclined pile (θ)	x_5	fixed (20°)	x_3	fixed (20°)

Table 4.2 Input data for design formulation

parameter	value	parameter	value
current level(C_l)	± 2.0 m	wave height(H_{max})	9.2 m
wave period(T)	7 sec	wind velocity(U_{max})	50 m/s
elastic modulus(E)	2.1×10^6kg/cm^2	current velocity(V_{max})	2.0 kt
unit weight of concrete(r_c)	2350 kg/m^3	unit weight of pile(r_s)	7850 kg/m^3
sea water density(ρ)	1.03 t/m^3	safety factor(F_s)	3.0
shape coefficient(C_s)	0.5	drag coefficient(C_D)	0.5
height coefficient(C_h)	1.0	inertia coefficient(C_m)	2.0

Table 4.3 Soil condition of installation site

layer depth (m)	kind of soil	modified N value	friction angle φ	friction coefficient μ	unit weight of soil r(t/m^3)	unit of weight undersea r(t/m^3)	adhesive force C(t/m^2)	compresive intensity qu(t/m$_2$)
17.0	clay	0			1.5	0.5	1.39	2.78
12.0	sand	23	34°	0.4	2.0	1.0		
19.0	clay	5			1.6	0.6	6.0	12.0
1.80	sand	50	37°	0.6	2.0	1.0		

Table 4.4 Initial and optimum value (PLBA)

D.V	Case 1		Case 2		D.V	Case 3		Case 4	
	I.V	O.V	I.V	O.V		I.V	O.V	I.V	O.V
x_1	3.84	3.816	2.0	3.060	x_1	2.0	3.840	2.0	3.800
x_2	0.032	0.031	0.1	0.061	x_2	0.1	0.032	0.1	0.033
x_3	3.84	3.861	2.0	5.000	x_3	20	1	20*	20*
x_4	0.032	0.031	0.1	0.015					
x_5	1	1	20*	20*					
N.I	2		9		N.I	25		21	
cost (ton)	4837	4746	8276	3972	cost (ton)	8276	4887	8276	5168

Table 4.5 Other initial and optimum value (PLBA)

D.V	Case 1		Case 2		D.V	Case 3		Case 4	
	I.V	O.V	I.V	O.V		I.V	O.V	I.V	O.V
x_1	3.816	3.811	3.06	3.060	x_1	3.84	3.840	3.8	3.829
x_2	0.031	0.031	0.061	0.061	x_2	0.032	0.032	0.033	0.032
x_3	3.861	3.859	5.0	5.000	x_3	1	1	20*	20*
x_4	0.031	0.031	0.02	0.015					
x_5	1	1	20*	20*					
N.I	2		1		N.I	1		10	
cost (ton)	4701	4693	3983	3983	cost (ton)	4837	4837	5189	5124

Table 4.6 Initial and optimum value (IMSL)

D.V	Case 1		Case 2		D.V	Case 3		Case 4	
	I.V	O.V	I.V	O.V		I.V	O.V	I.V	O.V
x_1	2.0	2.536	2.0	3.342	x_1	2.0	2.536	2.0	4.247
x_2	0.1	0.042	0.1	0.033	x_2	0.1	0.042	0.1	0.042
x_3	2.0	2.536	2.0	4.235	x_3	20	1	20*	20*
x_4	0.1	0.042	0.1	0.042					
x_5	20	1	20*	20*					
N.I	7		10		N.I	7		10	
cost (ton)	8276	4220	8276	6889	cost (ton)	8276	4220	8276	7463

Table 4.7 Other initial and optimum value (IMSL)

D.V	Case 1		Case 2		D.V	Case 3		Case 4	
	I.V	O.V	I.V	O.V		I.V	O.V	I.V	O.V
x_1	2.536	4.652	3.342	3.342	x_1	2.536	4.876	4.247	3.896
x_2	0.042	0.020	0.033	0.033	x_2	0.042	0.020	0.042	0.049
x_3	2.526	4.652	4.235	4.235	x_3	1	1	20*	20*
x_4	0.042	0.020	0.042	0.042					
x_5	1	1	20*	20*					
N.I	21		4		N.I	19		5	
cost (ton)	4193	3594	6828	6889	cost (ton)	4193	3744	7381	7853

'*'-fixed design variable, D.V-design variable, N.I-number of iteration

I.V-initial value, O.V-optimum value.