

프리스트레스트 프리캐스트 콘크리트 패널을 이용한 잔교식부두의 최적설계

A Study on Design Optimization of Mooring Pier using Prestressed Precast Concrete Panel

조 병 완 , 태 기 호 , 김 용 철

Jo, byung wan* Tae, ghi ho** ◦ kim, yong chul***

ABSTRACT

Recently, the area of design optimization, especially structural optimization, has been and to be a continuous active area of research. And the design optimizations of port facilities have been achieved by many other civil engineers. But the design optimization of port facilities were limited to the design optimization of the breasting dolphin. This paper invested the design optimization of mooring pier and the foundations of mooring pier was suggested considering the convenience of repair and reinforcement work. The mooring pier devised with prestressed precast concrete panel and rigid frame welded wide flange beam to steel pipe pile. To accomplish the design optimization of mooring pier, the Augmented Lagrangian Multiplier Method(ALM) of ADS(Garret N. Vanderplaats) optimization routine, BFGS method as optimizer and Golden Section Method as one dimensional search were utilized. As a result, thirty percent of material cost for construction was reduced by design optimization. The tensile stress of concrete panel and bottom flange was critical constraints under service load. So, using high strength concrete and steel will be economical. And lots of initial values must be invested to accomplish the design optimization in design procedures.

1.서론

항만구조물은 구조물 지지형식에 따라 잔교식, 중력식, 돌핀링크식으로 나눌 수 있으며 대상장소의 자연여건 및 경제성 등에 의해서 구조형식이 결정되고 있다.

항만구조물은 태풍과 해일 등에 의한 재해하중과 더불어 선박의 이상접안에 따른 사고하중에 의한 구조체의 파손이 항시 발생할 수 있고, 구조물의 노후화에 따른 내하력 감소가 있을 수 있다. 이러한 구조체의 파손문제나 노후화에 따른 내하력의 감소문제를 극복하기 위해서는 보수보강이 용이한 새로운 구조형식의 부두개발이 필요한 현실이다.

이를 위해서 본 연구에서는 새로운 부재로의 교체가 용이한 프리스트레스트 프리캐스트 콘크리트 패널형식의 잔교식부두의 제안과 수치적 최적화기법의 도입을 목적으로 프리스트레스트 프리캐스트 패널을 이용한 잔교식부두의 최적화를 수행한 결과 초기설계치에 비해서 총 재료비의 31%를 감소시킬 수 있었으며, 사용하중시 콘크리트패널의 하부인장응력과 합성단면의 하부플랜지가 허용인장응력에 가까이 접근하여 지배적인 구속조건인 것으로 나타났으므로 고강도의 콘크리트와 강재를 사용하는 것이 경제적인 것으로 판단된다. 또한, 초기치에 따라서 최적결과가 다르게 나타나는 것을 볼 때, 기타 다른 공학문제와 동일하게 다중해(Multi Solution)를 갖는 최적함수임을 알 수 있었으므로 설계시에는 다양한 초기치를 이용해서 접근해야 한다.

* 한양대학교 도시환경건설 공학부 부교수

** 한양대학교 토목공학과 박사 과정

*** 한양대학교 토목공학과 석사 과정

2. 프리스트레스트 프리캐스트 잔교식 부두의 설계

2.1 선박의 접안에너지

선박의 접안에너지는 질량과 속도함수인 운동에너지 개념에 의해서 계산하며, 식 1과 같은 방법에 의해서 산정한다.

$$E_f = \frac{W_s V^2}{2g} \times C_e \times C_m \times C_s \times C_c \quad (\text{식 1})$$

여기서 E_f : 선박의 접안에너지($t \cdot m$), g : 중력가속도(m/s^2)

W_s : 선박의 배수량(ton), V : 선박의 접안속도(m/s)

C_e : 편심계수, C_m : 가상질량계수, C_s : 유연성계수, C_c : 선석의 형상계수

$$C_e = \frac{1}{1 + (\frac{1}{r})^2} = \frac{1}{1 + (\frac{37.5}{201/4})^2} = 0.642$$

$$C_m = 1 + (\frac{\pi}{2C_b}) \times (\frac{d}{B}) = 1 + (\frac{\pi}{2 \times 0.34}) \times (\frac{10.6}{27.1}) = 2.81$$

$$C_b = \frac{20,000}{201 \times 27.1 \times 10.6 \times 1.03} = 0.34$$

$$C_s = 1.0$$

$$C_c = 1.0$$

$$\therefore E_f = \frac{20,000 \times 0.20^2}{2 \times 9.81} \times 0.642 \times 2.81 \times 1.0 \times 1.0 = 73.56 t \cdot m$$

2.2 프리스트레스트 프리캐스트 패널의 상부구조 설계

2.2.1 단면계수 산정

$$E_c = 2.8 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2, E_p = 2.0 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2 \quad \therefore n = E_p/E_c = 7.14$$

$$A_e = A_c + nA_p = bh + (7.14 - 1)A_p = 31,517 \text{ cm}^2$$

여기에서, A_p = 강선의가닥선 \times 강선의단면적 = 2.774 cm^2

b = 프리스트레스트 프리캐스트 패널의 폭

h = 프리스트레스트 프리캐스트 패널의 높이

따라서 가정단면의 하연에서 PC강선 도심까지의 거리를 y_p 라고 한다면, 가정단면의 하연에서 환산단면 중립축까지의 거리 y_2 는 다음과 같다.

$$y_2 = \frac{(b \times h \times h/2) + (n-1)A_p \times y_p}{A_e} \quad (\text{식 2})$$

환산단면 중립축에서 PC강선도심까지의 거리를 e_p 라고 하고 환산단면의 중립축에 대한 단면 2차모멘트를 I_e 라고 하면

$$e_p = y_2 - y_p = 24.99 - 7.5 = 17.49 \text{ cm}$$

$$I_e = \frac{bh^3}{12} + bh \times (\frac{h}{2} - y_2)^2 + (n-1)A_p \times e_p^2 \quad (\text{식 3})$$

프리스트레스트 프리캐스트 패널상연에서 환산단면 중립축까지의 거리를 y_1 , 패널상연의 단면계수를

W_c' 라고 하고, 패널하연의 단면계수를 W_c , PC강재의 도심에서의 단면계수를 W_{cg} 라고 한다면, 각각은 다음과 같다.

$$W_c' = \frac{I_e}{(h-y_2)} = \frac{I_e}{y_1} = \frac{6,567,713}{25.01} = 262,603 \text{ cm}^3$$

$$W_c = \frac{I_e}{y_2} = \frac{6,567,713}{24.99} = 262,813 \text{ cm}^3, \quad W_{cg} = \frac{I_e}{e_p} = \frac{6,567,713}{17.49} = 379,629 \text{ cm}^3$$

2.2.2 휨 모멘트에 대한 슬래브단면의 응력산정

[1] 슬래브 자중에 의한 휨모멘트

$$w_{sd} = (2.5 \times 10^{-3} bh) \text{ kg/cm} = 2.5 \times 10^{-3} \times 630 \times 50 \text{ kg/cm} = 78.75 \text{ kg/cm}$$

$$M_{sd} = \frac{w_{sd} l^2}{8} = \frac{78.75 \times 530^2}{8} = 2,765,109 \text{ kg} \cdot \text{cm}$$

[2] 상재하중에 의한 모멘트

$$w_l = 0.3 \times b = 0.3 \times 630 = 189 \text{ kg/cm}$$

$$M_d = \frac{w_l l^2}{8} = \frac{189 \times 530^2}{8} = 6,636,262 \text{ kg} \cdot \text{cm}$$

[3] 슬래브 자중과 상재하중에 의해서 발생하는 총모멘트

$$M_t = M_{sd} + M_d = \frac{w_{sd} l^2}{8} + \frac{w_l l^2}{8} = 9,401,371 \text{ kg} \cdot \text{cm}$$

2.2.3 프리스트레싱에 이후의 응력산정

[1] 콘크리트의 탄성변형에 의한 응력감소

$$\Delta\sigma_{pe} = \frac{np(1 + \frac{e_p^2}{r^2})\sigma_{pi} - nM_d \frac{e_p}{I_e}}{1 + np(1 + \frac{e_p^2}{r^2})} \quad (\text{프리텐션방식-식 4})$$

$$\Delta\sigma_{pe} = \frac{1}{2} n\sigma_{ci} \frac{N-1}{N} \quad (\text{포스트텐션방식-식 5})$$

$$\therefore \Delta\sigma_{pe} = \frac{1}{2} n\sigma_{ci} \frac{N-1}{N} = \frac{1}{2} \times 7.14 \times 15,200 \times \frac{2,774}{31,500} \times \frac{2-1}{2} = 2.39 \text{ kg/cm}^2$$

[2] PC강선의 릴렉сей션에 의한 응력감소

PC 강선의 릴렉сей션에 의한 응력감소비를 4%로 고려한다면, 응력감소량은 다음과 같다.

$$\Delta\sigma_{pr} = 0.04 \times \sigma_{pi} = 608 \text{ kg/cm}^2 \quad (\text{식 6})$$

[3] 프리스트레스력에 의한 프리캐스트 패널의 응력

PC 강선에 도입한 프리스트레스력은 이상과 같이 콘크리트의 탄성변형과 강선의 릴렉сей션에 의한 응력감소가 발생하게 된다. 따라서 프리스트레스력 도입직후, PC 강선의 응력과 긴장재의 인장력은 다음과 같아진다.

$$\sigma_{pt} = \sigma_{pi} - \Delta\sigma_{pe} - \Delta\sigma_{pr} = 15,200 - 2.34 - 608 = 14,590 \text{ kg/cm}^2 \quad (\text{식 7})$$

$$P_t = A_p \times \sigma_{pt} = (2,774) \times 14,590 = 40,472 \text{ kg} \quad (\text{식 8})$$

$$\sigma_t = \frac{P_t}{A_e} - \frac{P_t \times e_p}{I_e} \times y_1 = \frac{40,472}{31,517} - \frac{40,472 \times 17.49}{6,567,713} \times 25.01 \quad (\text{식 9})$$

$$\sigma_b = \frac{P_f}{A_e} + \frac{P_f \times e_2}{I_e} \times y_2 = \frac{40.472}{31,517} + \frac{40.472 \times 17.49}{6,567,713} \times 24.99 \quad (\text{식 } 10)$$

2.2.4 하부강관말뚝의 설계

하부강관말뚝을 설계할 때 고려하는 하중으로는 상부구조에서 전달되는 축압축력, 축인장력, 수평력 및 휨모멘트가 있다. 허용응력설계법에서는 압축력이 허용지지력을 넘지 않아야 하며, 장기간 지속하중에 대해 각각의 말뚝에 균등한 하중을 받도록 말뚝을 배치해야 하며 축방향력과 휨모멘트가 동시에 작용할 때는 그 합성력을 고려해야 한다.

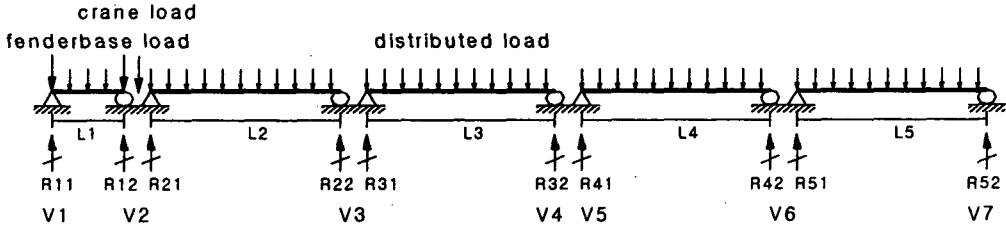


그림 1. 파일에 전달되는 수직력

3. 최적설계문제

ALM은 SUMT의 수렴성과 효율성을 높이기 위하여 최적성 조건을 도입한 방법으로 목적함수는 설계변수와 벌칙매개계수 및 라그랑지승수의 함수이다.

$$\text{Minimize } \Phi(X, r_p) = F(X) + r_p P(X) \quad (\text{식 } 11)$$

3.1 최적설계로의 정식화

유한차원의 구조최적화에서 비선형문제는 다음과 같이 정식화한다.

$$\text{Find } x = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)^T \quad (\text{식 } 12)$$

$$\text{To minimize } F(x) = F(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (\text{식 } 13)$$

$$\text{Subject to } h_i(x) = h_i(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) = 0, \quad i=1, 2, \dots, m$$

$$g_j(x) = g_j(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \leq 0, \quad j=1, 2, \dots, k$$

3.2 설계변수

최적설계문제로의 정식화를 위해서 선정한 설계변수들은 크게 하부강관파일에 관한 설계변수와 프리스트레스트 프리캐스트 패널에 관한 설계변수와 H형강재에 관한 설계변수로 나누어진다.

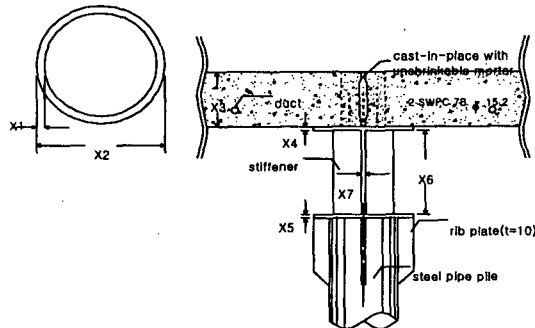


그림 2. 설계변수

X1 = 강관파일의 두께, X2 = 강관파일의 직경, X3 = 프리스트레스트 프리캐스트 패널의 높이
X4 = 상부플랜지의 두께, X5 = 하부플랜지의 두께, X6 = 웨브의 높이, X7 = 웨브의 두께

3.3 목적함수

프리스트레스트 프리캐스트 부재를 이용한 잔교식부재의 최적설계를 위해서 최적화목적함수로는 총 재료비용의 최소화로 선정하였으며, 목적함수는 식 14와 같다.

$$OBJ = CP \times PILE + CS \times STEEL + CC \times CONC \quad (\text{식 14})$$

$$PILE = 7.5(\pi \times X(1) \times (X(2) - X(1)) \times (55 \times 40 + 22 \times 40 \times 1.054)) \times 0.0001$$

$$STEEL = 7.5 \times (120 \times (X(4) + X(5)) \times 319 + (X(6) \times X(7)) \times 319) \times 0.0001$$

$$CONC = 19.43 \times X(3)$$

3.4 제약조건

【1】 전체좌굴(응력)에 대한 제약조건

$$\frac{P(i)}{A_e \cdot \sigma_{ca}} + \frac{M(i)}{Z \cdot \sigma_{ba}} \leq 1.0 \quad (i=1, 2, 3, \dots, 77) \quad (\text{식 15})$$

【2】 연직지지력에 대한 제약조건

$$\frac{P(i) \cdot F_s}{[0.8(40N \frac{L_b}{D} A_p) + \frac{N_m}{5} A_{1s} + CA_{2s}]} \leq 1.0 \quad (i=78, 79, 80 \dots 154) \quad (\text{식 16})$$

【3】 축방향 인발력에 대한 제약조건

$$\frac{P(i)}{\frac{N_m A_{1s}}{5} + C_m A_{2s}} \leq 1.0 \quad (i=155, 156, 157 \dots 231) \quad (\text{식 17})$$

3.5 최적화기법의 결과

프리스트레스트 프리캐스트 패널을 이용한 잔교식부재의 최적화를 수행한 결과 470여회의 반복계산 후에 총 재료비의 31%를 감소시킬 수 있었으며 재료비용의 감소효과는 강관파일, 강재, 콘크리트의 순이었고 강관파일과 강재의 감소는 큰 반면에 콘크리트의 감소는 미소하였다.

또한 각 재료비용의 감소효과는 콘크리트가 2.35%, 강재가 26.7%, 강관파일이 33.2%로 감소 하였다.

표 1 최적화 결과

설계변수 최적결과	강관 두께	강관 직경	패널 두께	상부플랜지 두께	하부플랜지 두께	웹브 높이	웹브 두께
초기설계	1.2	100	50	3	4	100	2
최적결과	0.881	90.73	48.83	2.27	2.80	88.0	1.75
감소율(%)	26.6	9.3	4.5	24.3	30	12	12.5

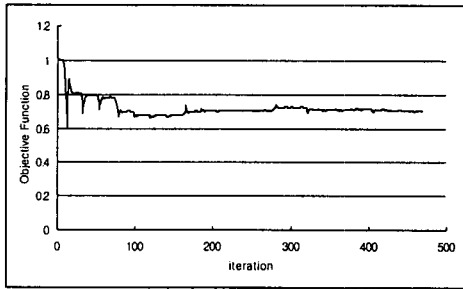


그림 3. 목적함수의 수렴양상

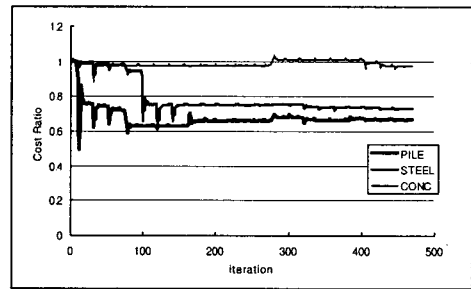


그림 4. 최적화 단계별 각 재료비용의 변화

4. 결론

【1】 프리스트레스트 프리캐스트 패널을 이용한 잔교식 부두의 최적화를 수행한 결과 최적설계를 도입하지 않은 초기설계치에 비해서 총재료 비용의 31%를 감소시킬 수 있었으며 목적함수를 최소화시키는 과정에서 상대적으로 단가가 높은 강관파일과 강재의 재료비용을 낮추는 것이 전체적인 총재료 비용의 측면에서 유리한 것으로 나타났다.

【2】 상·하부플랜지두께의 감소율이 각각 24.3%와 30%로 감소효과가 큰 반면에 웨브의 깊이와 두께의 감소율이 각각 12%와 12.5%로 다소 작았으며, 웨브의 깊이를 감소시키게 되면 강재의 사용량이 줄어들어서 전체목적함수는 줄어들게 되지만 단면2차모멘트가 급격하게 감소하기 때문인 것으로 생각된다.

【3】 상·하부플랜지와 웨브두께가 동일한 초기치를 가진 경우의 감소효과는 상부플랜지의 두께, 하부플랜지의 두께, 웨브두께의 순으로 나타났으며, 상대적으로 단가가 낮은 콘크리트 패널이 합성단면의 압축력을 분담하기 때문에 상부플랜지두께의 감소효과가 큰 것으로 생각된다.

【4】 사용하중시 콘크리트패널의 하부인장응력과 합성단면에서의 하부플랜지가 허용인장응력에 가까이 접근하여 지배적인 구속조건인 것으로 나타났으며 고강도의 콘크리트와 강재를 사용하는 것이 경제적인 것으로 생각된다.

【5】 기타 다른 공학문제와 동일하게 다중해(Multi Solution)를 갖는 최적함수임을 알 수 있었으므로 설계시에는 다양한 초기치를 이용해서 접근해야 할 것으로 생각된다.

【6】 총 공사비용을 줄이기 위해서는 강관말뚝의 치수를 줄여서 재료비용을 저감시키는 일뿐만 아니라 말뚝의 개수를 줄이는 것이 필요할 것으로 생각된다. 이를 위해서는 위상최적화가 필요할 것으로 생각된다.

5. 참고문헌

- 【1】 김동근 (1999). "동적거동과 경제성을 고려한 접안돌핀의 최적설계에 관한 연구", 공학석사학위논문, 한양대학교.
- 【2】 박상길 (1996), "港灣海洋構造物의 設計", 平文閣.
- 【3】 이나리 (1998). "강관말뚝식 계류돌핀의 설계최적화", 공학석사학위논문, 부경대학교.
- 【4】 해운항만청 (1993). "항만시설물 설계기준서 : 상·하권", 해운항만청.
- 【5】 Arora, J. S. (1989). "Introduction of Optimum Design", McGraw-Hill.
- 【6】 Garret N. Vanderplaats, "ADS : A FORTRAN Program for Automated Design Synthesis", Engineering Design Optimization, Inc., Santa Barbara, California, 1985.