

케이슨 구조계의 설계 최적성 평가

Methods of Design Optimality Evaluation for Caisson Structural Systems

최민희* 류연선** 조현만*** 나원배****
Choi, Min-Hee Ryu, Yeon-Sun Cho, Hyun-Man Na, Won-Bae

ABSTRACT

Numerical procedure of design optimality evaluation is studied for caisson structural systems. Two kinds of evaluation methods can be considered; mathematical optimality criteria method (MOCM) and numerical optimization method (NOM). The choice of the method depends on the available information of the system. MOCM can be used only when the information of all function values, gradients and Lagrange multipliers is available, which may not be realistic in practice.

Therefore, in this study, NOMs are applied for the structural optimality evaluation, where only design variables are necessary. To this end, Metropolis genetic algorithm (MGA) is advantageously used and applied for a standard optimization model of caisson composite breakwater.

In the numerical example, cost and constraint functions are assumed to be changed from the original design situation and their effects are evaluated for optimality. From the theoretical consideration and numerical experience, it is found that the proposed optimality evaluation procedure with MGA-based NOM is efficient and practically applicable.

1. 서 론

케이슨 구조계는 대수심, 연약지반에도 시공이 가능하고 주위환경의 영향을 비교적 적게 받으며, 내파성이 강하고 공사비를 절약할 수 있는 장점으로 해안구조물에서 주로 사용되고 있는 대표적인 구조 양식이다.

케이슨 구조계의 설계시 시공 전 또는 시공 중에 현장 조건이 바뀌어서 설계가 변경되거나, 이미 시공되어 있는 구조물이 보수 및 보강 등의 성능개선이 필요한 경우, 설계조건이 변화될 수 되어서 재설계 및 설계변경을 해야 하는 경우가 생길 수 있다. 이러한 경우, 최적성을 평가하여 기존설계의 유용여부 및 최적여부에 대한 판정이 필요한데, 최적성 평가 기법 및 관련 연구가 많이 부족하다. 그래서 기존의 구조물의 최적성을 평가할 수 있는 기법에 대한 연구가 필요하다. 본 연구의 목적은 대표적인 케이슨 구조계라고 할 수 있는 케이슨 혼성방파제의 최적성 평가 과정 및 방법을 제시하는 것이다.

최적성을 평가하는 방법으로는 수학적 최적성 규준이 되는 Kuhn-Tucker(K-T) 필요조건을 이용하는 방법¹⁾과 수치적 최적화 기법을 이용하는 방법이 있다. 기존의 설계에 대한 정보로서 설계변수, 목적함수, 제약함수, 목적함수와 제약함수의 경사도 그리고 라그랑지 승수 등이 모두 가용하다면 K-T 필요조건을 이용하여 최적성을 평

* 정희원·부경대학교 해양공학과 공학석사
** 정희원·부경대학교 해양공학과 교수
*** 정희원·(주)삼성건설 부산민자부두 설계과장, 공학박사
**** 정희원·부경대학교 해양공학과 조교수

가 할 수 있다. 하지만 기존설계에 대하여 설계변수와 목적함수 그리고 제약함수만을 알고 있거나 단순히 설계 변수만을 알고 있다고 한다면, 수학적 최적성 규준법을 사용할 수 없게 된다. 이러한 경우에는 수치적 최적화 기법을 이용하여 새로운 최적설계문제에 대한 최적해를 구한 다음 기존 설계의 최적성을 판정해야 한다. 그러나 수치적 최적화 기법을 이용한 최적성 평가의 구체적인 방법은 제시되어 있지 않다. 따라서 본 연구에서는 수치적 최적화 기법 중 그 수렴성 및 효율성이 검증된 메트로폴리스 유전알고리즘(Metropolis genetic algorithm ; MGA)²⁾을 이용한 최적성 평가 과정과 방법을 제시하고, 그 응용성을 확인하고자 한다.

2. 혼성방파제 케이스 구조계

2.1 구성 및 설계과정

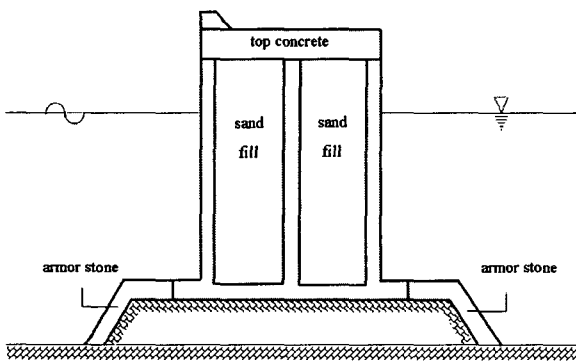


Fig.2.1 Cross-section of caisson composite breakwater.

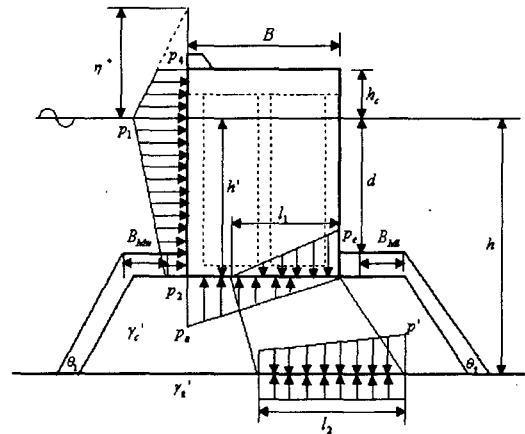


Fig.2.2 Dimension and external forces of caisson composite breakwater.

혼성방파제 케이스 구조계는 Fig.2.1과 같이 상치 콘크리트, 케이스 직립부, 속채움, 시초사석, 피복제, 그리고 기초지반으로 구성되어 있다³⁾.

혼성방파제 케이스 구조계의 설계시 먼저 천단고와 상치콘크리트의 높이를 결정한 후, 케이스 직립부에 받는 외력을 고려하여 설계자료를 산정하며, 사석기초부와 피복사석 그리고 기초지반의 설계자료를 산정한다.

직립부와 사석기초부의 설계는 Goda가 제안한 설계파로써 최대파를 사용한 혼성방파제 설계식을 기초로 한다. 그리고 Terzaghi의 극한 지지력 공식을 이용하여 기초지반의 허용지지력에 대한 설계를 하며, Hudson의 식을 이용하여 피복사석부의 중량을 산정한다. 그리고 혼성방파제 케이스 구조계가 받는 외력도는 Fig.2.2와 같고⁴⁾, 설계조건은 구조역학적 안정성과 수리학적 안정성 조건으로 구성한다⁵⁾.

2.2 설계변수와 목적함수

케이스 문제의 표준모형은 Fig.2.3에서 보는 바와 같이 6개의 격실을 가진 케이스 혼성방파제이다. 혼성방파제 단면의 치수를 설계변수로 하며 6개의 설계변수를 설정한다. x_1 은 케이스 직립부의 격실 폭(모든 격실의 크기는 동일), x_2 는 케이스 직립부의 높이에서 상치콘크리트와 toe의 높이를

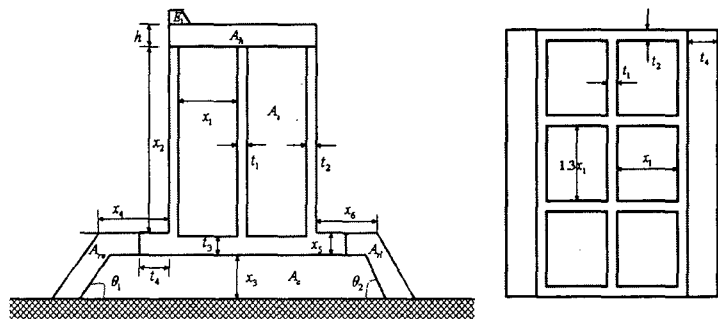


Fig.2.3 Design variable of caisson composite breakwater.

제외한 부분, x_3 는 사석기초부의 높이, x_4 는 toe를 포함한 항외측 berm의 폭, x_5 는 toe의 높이(피복제의 두께와 일치)이고, x_6 는 toe를 포함한 항내측 berm의 폭이다. 그 외의 치수는 상수로 취급한다.

목적함수는 혼성방파제의 단위 체적당의 가격으로 하며 식(2-1)과 같다.

$$f(x) = A_h P_h + A_u P_u + A_c P_c + A_s P_s + A_{rw} P_{rw} + A_{rl} + P_{rl} \quad (2-1)$$

여기서, $A_h, A_u, A_c, A_s, A_{rw}$ 그리고 A_{rl} 은 각각 상치콘크리트, 직립부, 사석기초부, 속채움, 항외측 berm 그리고 항내측 berm의 단면적이다. 그리고 P_h 는 무근콘크리트 가격, P_u 는 철근콘크리트 가격, P_c, P_{rw}, P_{rl} 은 사석의 가격 그리고 P_s 는 속채움 모래의 가격이다.

2.3 제약조건

표준 모형의 제약함수는 직립부의 활동에 대한 안정, 직립부의 전도에 대한 안정, 사석기초부의 허용지지력에 대한 안정, 기초지반의 허용지지력에 대한 안정, 사석기초부의 평면 활동에 대한 안정, 사석기초부의 피복 사석의 안정 그리고 부가설계조건 등을 고려하여 Table 2.1과 같이 적용한다.

여기서, μ_1 은 직립부와 기초사석부의 마찰계수, W_e 는 양압력을 뺀 체중량, P 는 케이슨 혼성방파제의 전면에 작용하는 파압, M_u 는 양압력에 의한 모멘트, M_p 는 파력에 의한 전도 모멘트, P_e 는 기초사석부의 지지력, P' 는 기초지반의 극한 지지력, q_a 는 허용지지력, μ_2 는 core의 마찰계수, F 는 평면활동의 안전율, R_x 는 사석블록의 폭, R_z 는 사석블록의 범선방향의 길이, $H_{1/3}$ 은 유의파고, N_s 는 피복사석의 안정계수, $S_r = r_r/w_0$, 그리고 h 는 방파제의 설치수심이다.

Table 2.1 Constraints for optimum design

Sliding of upright section	$\varepsilon_1 = -\frac{\mu_1 W_e}{1.2P} + 1.0 \leq 0$
Overturning of upright section	$\varepsilon_2 = \frac{M_u - W_e}{1.2M_p} + 1.0 \leq 0$
Allowable bearing capacity of rubble - mound foundation	$\varepsilon_3 = \frac{P}{50} - 1.0 \leq 0$
Allowable bearing capacity of sea bed	$\varepsilon_4 = \frac{P'}{q_a} - 1.0 \leq 0$
Sliding of rubble mound	$\varepsilon_5 = -\frac{\mu_2 F}{1.2} + 1.0 \leq 0$
Side constraints	$\varepsilon_6 = -\frac{x_3 + x_4}{h + 0.6H_{1/3}} + 1.0 \leq 0$
	$\varepsilon_7 = -\frac{x_3}{1.5} + 1.0 \leq 0$
	$\varepsilon_8 = -\frac{x_4}{2R_x} + 1.0 \leq 0$
	$\varepsilon_9 = \frac{x_5 + x_6}{h} - 1.0 \leq 0$
	$\varepsilon_{10} = -\frac{x_6}{5} + 1.0 \leq 0$
	$\varepsilon_{11} = -x_1 \leq 0$
	$\varepsilon_{12} = -x_2 \leq 0$
$\varepsilon_{13} = -x_5 \leq 0$	
Weight of armor stone	$\varepsilon_{14} = \frac{1}{R_x R_z x_5} \left\{ \frac{H_{1/3}}{N_s (S_r - 1)} \right\}^3 - 1.0 = 0$

3. 설계 최적성의 평가과정

3.1 비선형 계획 문제

일반적인 최적설계문제는 등호제약함수와 부등호제약함수를 만족하면서 목적함수를 최소화하는 설계변수 벡터를 찾는 것이다. 이를 비선형 계획의 최적설계 문제로 정의하면, 다음 식(3-1)과 같이 정식화 할 수 있다.

Find

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$$

to minimize

$$f(x) = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (3-1)$$

subject to

$$h_i(x) = h_i(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0; \quad i = 1, p$$

$$g_j(x) = g_j(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0; \quad j = 1, m$$

여기서, x 는 n 차원 설계변수 벡터, $f(x)$ 는 목적함수, $h_i(x)$ 는 i 번째 등호 제약함수, $g_j(x)$ 는 j 번째 부등호 제약함수, p 는 등호제약함수의 개수 그리고 m 은 부등호제약함수의 개수이다.

3.2 설계 최적성

최적설계의 과정과 기존설계의 최적성 평가과정은 밀접한 관계가 있다. 기존설계에 대한 최적성의 평가 과정을 도시하면 Fig.3.1와 같다.

최적성 평가의 첫 단계에서는 설계유용성의 평가를 위해 제약조건을 점검한다. 모든 제약조건을 만족하면 기존 설계는 유용설계이다. 유용설계에 대해 최적성을 평가하려면 가용정보를 점검해야 한다. 수학적 최적성 기준법을 사용하기에 가용정보가 충분하지 않다면, 수치적 최적화 기법을 이용하여 최적성을 평가한다. 여기서 최적성의 평가에 최적성 지수를 도입하여 사용할 수 있다.

$$\alpha = \left| \frac{f(x^*) - f(x^c)}{f(x^*)} \right| \quad (3-2)$$

여기서, α 는 최적성 지수, f 는 새로운 최적화 문제의 목적함수, x^* 는 기존설계 그리고 x^c 는 새로운 최적화 문제의 최적해이다.

본 연구에서 $\alpha \leq 0.01$ 로 설정하며 이 조건에서 만족하면 기존 설계가 최적이라 판정한다.

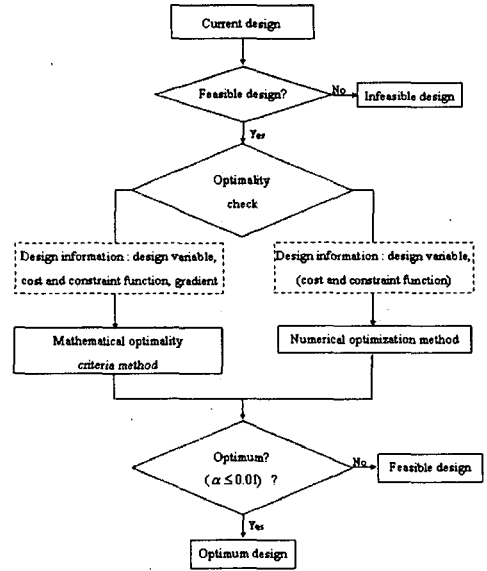


Fig.3.1 Procedure of design optimality evaluation.

3.3 수학적 최적성 기준

Fig. 3.1의 평가과정에서 보인 바와 같이, 기존 설계의 가용정보에 따라 최적성 평가방법이 달라진다. 기존설계의 설계변수, 목적함수, 제약함수, 목적함수의 경사도 및 제약함수의 라그랑지 승수에 대한 정보가 모두 가용하면 수학적 최적성 기준법을 사용할 수 있다. 수학적 최적성 기준법은 식(3-1)의 비선형 계획문제의 최적성 필요조건(Kuhn-Tucker necessary condition)을 점검하여 설계의 최적성을 평가하는 방법이다. 이 방법은 기존의 설계가 최적해 x^c 를 가지고 라그랑지 승수 v^* , u^* 와 목적함수와 제약함수의 경사도에 대한 정보를 가지고 있을 때만 사용할 수가 있다.

x^c , v^* , u^* 그리고 목적함수와 제약함수의 경사도를 다음 조건(식(3-3)~식(3-7))에 대입하여 만족하면 x^c 는 최적해이다.

$$\frac{\partial L}{\partial x_j} \equiv \frac{\partial f}{\partial x_j} + \sum_{i=1}^p v_i^* \frac{\partial h_i}{\partial x_j} + \sum_{i=1}^m u_i^* \frac{\partial g_i}{\partial x_j} = 0; \quad j = 1, n \quad (3-3)$$

$$h_i(x^c) = 0; \quad i = 1, p \quad (3-4)$$

$$g_i(x^c) + s_i^2 = 0; \quad i = 1, m \quad (3-5)$$

$$u_i^* s_i = 0; \quad i = 1, m \quad (3-6)$$

$$u_i^* \geq 0; \quad i = 1, m \quad (3-7)$$

여기서, s_i^2 은 부등호 제약함수를 등호 제약함수로 변환시키기 위한 완화변수이다.

3.4 수치적 최적화 기법

일반적으로 기존 구조물의 최적성을 평가 할 때에 제공되는 가용정보로는 설계변수, 목적함수 그리고 제약함수만 주어진다. 또는 설계변수만이 가용정보로 주어지는 경우가 있다. 이 때에는 수치적 최적화 기법을 사용해야 하고, 적용할 수 있는 기법으로는 영계방법, 1계방법 그리고 2계방법이 있다. 그 중 최근 사용이 증가되고

있는 기법으로는 영계방법인 확률론적 탐색기법으로 시뮬레이티드 어닐링(simulated annealing : SA), 유전알고리즘(genetic algorithm : GA) 등이 있다.

SA는 Metropolis 알고리즘을 사용하기 때문에 전역적 최적해를 찾는 능력이 뛰어나다⁶⁾. 그러나 최적해를 찾기 위한 반복계산으로 인해 계산시간이 많이 걸린다는 단점을 가지고 있다⁷⁾. SA를 최적성 평가에 사용할 때 기존의 설계가 최적해 근방의 해라고 하면 SA를 이용하여 전역적 최적해를 구할 수 있으므로 최적성 평가에 유용하다. 하지만 기존 설계가 최적해 근방의 해가 아니면 전역적 최적해를 구하는데 계산시간이 많이 걸리기 때문에 최적성 평가에 적합하지 않다.

GA는 방대한 문제공간에 대한 탐색능력과 전역적 최적해 근처까지 빠르게 수렴하는 장점을 가지고 있다⁸⁾. 그러나 최적해 근처에서의 탐색은 일반적으로 느리며, 최적해를 구하는 능력이 떨어지는 단점을 가지고 있다. 기존 설계가 최적에 가까운 해가 아니더라도 GA를 이용하면 빠른 수렴속도로 최적해 근처에 도달한다. 하지만 전역적 최적해를 찾는 능력이 떨어지므로 최적성 평가에는 적합하지 않은 기법이다.

그래서 SA의 주 요체인 Metropolis 알고리즘과 GA의 재생산 연산자를 조합하여 메트로폴리스 유전알고리즘(Metropolis genetic algorithm : MGA)이 개발되어 본 연구에서 사용하였다²⁾. MGA를 최적성 평가에 사용하면, 기존 설계가 최적에 가깝지 않더라도 전역적 최적해로의 수렴이 빠르다. 그러므로 MGA는 최적성 평가에 적합한 기법이라 할 수 있다.

MGA를 이용한 최적성 평가 과정에서, 먼저 기존 설계를 설계조건이 변화된 새로운 문제의 초기값으로 설정한다. 그리고 새로운 문제의 제약함수에 기존 설계값을 대입하여 유용설계 여부를 판단한다. 유용설계일 경우 새로운 문제의 최적해와 기존설계를 비교하여 판정한다. 이 때 식(3-2)의 최적성 지수가 사용된다.

4. 수치예

4.1 혼성방파제 케이스 구조계

혼성방파제 케이스 구조계의 최적성 평가를 위해 최적설계문제의 표준모형을 이용한다. 최적성 평가 방법으로 MGA를 기반으로 한 수치적 최적화기법을 사용한다. 케이스 혼성방파제에 작용하는 외력은 Fig.2.2와 같고, 제약함수는 구조역학적 안정성과 수리학적 안정성 조건으로 구성하였다.

4.1.1 설계자료

케이스 혼성방파제의 설계 최적화를 위한 입력자료는 방파제의 설치조건과 단면의 치수를 결정하기 위해 사용되는 계수 및 상수 등이 있으며 Table 4.1에 나타내었다. 혼성방파제 케이스 구조계를 설계하기 위해서 각 설계변수의 상한치는 30, 하한치는 0.1 그리고 문자열은 12로 사용하였다. 그리고 최적설계에서 집단크기와 최대반복 세대수를 각각 100과 1000으로 고정하였다. 혼성방파제 케이스 구조계의 단위 체적당 가격은 Table 4.2와 같이 정의하였다.

Table 4.1 Input data for design optimization of caisson composite breakwater

Input data	Value
Equivalent deep water wave height (H_0')	6.3 m
Period of design wave ($T_{1/3}$)	11.4 sec
Angle of incident wave direction (β)	0.26 rad
Water depth (h)	10.10 m
Slope of sea bottom (l)	0.01
Unit weight of upright section (γ_u)	3.20 t/m ³
Unit weight of rubble (γ_r)	2.65 t/m ³
Unit weight of core (γ_c')	1.00 t/m ³
Unit weight of foundation (γ_f')	1.00 t/m ³
Slope of rubble mound at weatherside (θ_1)	0.46 rad
Slope of rubble mound at leeside (θ_2)	0.59 rad
Bearing capacity factors (N_r, N_q)	6.80, 9.00
Length of foot-protection block (R_1)	4.00 m
Width of foot-protection block (R_2)	2.00 m
Friction coefficient between upright section and mound (μ_1)	0.60
thickness of top concrete (H)	2 m
thickness of inner wall (l_1)	0.3 m
thickness of outer wall (l_2)	0.4 m
thickness of bottom (l_3)	0.5 m
width of toe (l_4)	1.5 m

이산변수를 사용하는 MGA는 설계 값의 편차를 절대편차 뿐 아니라 이산변수 편차로 평가 하여야 한다. 절대 편차와 이산변수 편차 사이의 관계식은 식(4-1)과 같다.

$$e = \frac{\Delta x}{x^u - x^l} \times 100 (\%) \quad (4-1)$$

여기서, e 는 이산 변수 편차, Δx 는 절대편차, x^l 는 설계변수의 하한치 그리고 x^u 는 설계변수의 상한치이다.

4.1.2 기존의 최적설계

Table 4.2 Definition for material cost of caisson composite breakwater

Material	Cost (10,000 won)
Cost of plain concrete (P_1)	0.9
Cost of reinforced concrete (P_2)	1.1
Cost of rubble (P_r, P_{rl}, P_{rm})	0.65
Cost of sand (P_s)	0.6

Table 4.3 Investigation of constraint function

Constraints	value
Sliding of upright section (g_1)	-1.134
Overturning of upright section (g_2)	-30.35
Allowable bearing capacity of rubble mound foundation (g_3)	-0.7559
Allowable bearing capacity of sea bed (g_4)	-0.1145
Sliding of rubble mound foundation (g_5)	-1.1539
Weight of armor stone (h_1)	0

최적성 평가의 대상이 되는 기존 설계는 재래식 설계법

또는 최적설계법을 통하여 얻어진 것이다. 수치예제에서는 기존 설계를 최적설계로 간주한다. 최적성 평가의 대상이 되는 기존 설계는 앞에서 정식화 한 최적설계 문제의 표준 모형의 최적해로 한다. 먼저, 기존 설계를 산정하기 위해 최적설계 문제의 표준 모형의 최적해를 Table 4.4에 나타내었고, 기존설계의 제약함수 값은 Table 4.3에 나타내었다.

MGA를 이용한 수치적 최적화 기법의 적용성을 알아보기 위해, 설계문제가 변경되지 않은 경우에 대해 기존 설계의 최적성을 평가한다. 먼저 기존 설계값을 초기치로 하여 설계문제를 최적화 한다. 결과는 Table 4.4에 나타내었다. 문제가 달라지지 않았으므로, 기존 설계값을 새로운 문제의 제약함수에 대입하여 확인할 필요도 없이 제약함수에 모두 만족한다. 설계변수의 절대편차는 0.0%~0.39%이고, 목적함수는 0.014% 증가하였다.

이 문제의 최적성 지수는 0.00014로 기준인 0.01보다 작아서 기존 설계는 최적성을 만족한다. 설계 문제가 달라지지 않은 경우에 대해 최적성을 평가 할 때에는 최적성 지수 α 가 0이어야 한다. 여기서 0에 가깝기는 하나, 0이 나오지 않은 것은 MGA가 확률론적 탐색기법이기 때문이다.

Table 4.4 Current optimum design and optimality evaluation

Current design (optimum)			optimality evaluation		
Design variable	Value (m)	$f(x^*)$ (10,000 won)	Design variable	Value (m)	$f(x^*)$ (10,000 won)
x_1	26.269	726.319	x_1	26.269	726.471 ($\alpha=0.00014$)
x_2	11.344		x_2	11.344	
x_3	1.794		x_3	1.801	
x_4	8.051		x_4	8.073	
x_5	0.918		x_5	0.918	
x_6	5.007		x_6	5.007	

4.2 최적성 평가

4.2.1 목적함수의 변화와 최적성

목적함수가 변경 된 새로운 최적설계문제에 대하여 기존 설계의 최적성을 평가한다. 식(2-1)의 목적함수는 케 이슨 혼성방파제의 가격이므로 시장 상황변동 때문에 발생하는 단가의 변화에 따른 최적성의 평가는 대단히 중요하다.

Table 4.5 Initial and changed cost of materials

Material	Initial cost (10,000 won)	Changed cost (10,000 won)
plain concrete	0.9	1.1
reinforced concrete	1.1	1.3
rubble	0.65	0.75
sand	0.6	0.7

Table 4.6 Current optimum design and optimality evaluation

Current design (optimum)			optimality evaluation		
Design variable	Value (m)	$f(x^*)$ (10,000 won)	Design variable	Value (m)	$f(x^*)$ (10,000 won)
x_1	26.269	857.087	x_1	26.269	855.41 ($\alpha=0.00196$)
x_2	11.344		x_2	11.396	
x_3	1.794		x_3	1.736	
x_4	8.051		x_4	8.081	
x_5	0.918		x_5	0.896	
x_6	5.007		x_6	5.007	

모든 재료의 단가가 Table 4.5에서 보이는 것과 같이 모두 비일률적으로 변경된 경우, 목적함수가 새롭게 정의된다. 새로운 최적화 문제의 제약함수는 변화되지 않으므로 기존설계는 유용설계이다. 기존설계의 최적성을 평가하기 위해 기존설계와 새로운 문제의 최적설계를 Table 4.6에 비교하였다. 설계변수들의 절대편차는 약 0.0%~3.3%였고, 목적함수는 약 0.196% 감소하였다. 최적성 지수를 이용하여 최적성을 평가하면, 목적함수의 최적성 지수는 0.00196으로 기준인 0.01보다 작다. 그래서 기존 설계는 비일률적으로 목적함수가 변한 문제에서 최적성을 만족한다.

4.2.2 유용영역의 변화와 최적성

최적설계 표준모델은 14개의 부등호 및 등호 제약함수를 가지고 있다. 이 중에서 하나씩 제한한계를 변화시켜 유용영역이 변화되는 경우에 대해 최적성을 평가한다. 각 Case는 Table 4.7과 같이 정의한다.

Case1은 직립부의 활동에 대한 안전율이 변화된 문제로, 기존 설계의 유용성 여부를 결정하기 위해 변화된 제약함수 g'_1 의 함수 값을 검토하였을 때, g'_1 는

-0.707로 기존 설계는 유용설계이다. Case2는 직립부의 전도에 대한 안전율이 변화된 새로운 문제이다. 이 경우 기존설계의 유용성 여부를 결정하기 위해 변화된 제약함수 g'_2 의 함수값을 검토하였을 때, g'_2 는 -24.083으로 기존설계는 유용설계이다. Case3는 사석기초부 허용지지력의 한계가 변화된 새로운 문제로, 기존설계의 유용성 여부를 결정하기 위해 변화된 제약함수 g'_3 의 함수값을 검토한다. g'_3 는 -0.7966으로 기존설계는 유용설계이다.

Case4, Case5 그리고 Case6는 각각 직립부의 활동에 대한 제약, 직립부의 전도에 대한 제약 그리고 사석기초부의 허용지지력에 대한 제약이 제거된 문제이다. 제약함수의 제거는 제약함수가 무한대가 되는 것과 동일한 의미이므로 한계에 큰 수를 주어 제약함수가 설계시 제약에 영향을 주지 못하도록 표현한다. 제약함수가 변경되지 않고 제거되었으므로 제약함수에 대한 검토는 필요하지 않다.

Table 4.7 Definition of Case1~Case6

Case1	$g_1 = -\frac{\mu_4 W_e}{1.2 \times P} + 1.0 \leq 0 \rightarrow g'_1 = -\frac{\mu_4 W_e}{1.5 \times P} + 1.0 \leq 0$
Case2	$g_2 = \frac{M_u - W_1}{1.2 \times M_p} + 1.0 \leq 0 \rightarrow g'_2 = \frac{M_u - W_1}{1.5 \times M_p} + 1.0 \leq 0$
Case3	$g_3 = \frac{P_c}{50} - 1.0 \leq 0 \rightarrow g'_3 = \frac{P_c}{60} - 1.0 \leq 0$
Case4	$g_1 = -\frac{\mu_4 W_e}{1.2 \times P} + 1.0 \leq 0 \rightarrow g_1'' = -\frac{\mu_4 W_e}{P} - 10' \leq 0$
Case5	$g_2 = \frac{M_u - W_1}{1.2 \times M_p} + 1.0 \leq 0 \rightarrow g_2'' = \frac{M_u - W_1}{M_p} - 10' \leq 0$
Case6	$g_3 = \frac{P_c}{50} - 1.0 \leq 0 \rightarrow g_3'' = \frac{P_c}{10'} - 1.0 \leq 0$

4.3 결과 및 검토

유용영역의 변화를 나타낸 Table 4.8에서 보듯이 각 Case는 모두 최적성에 만족한다. Case1의 경우 x_3 의 절대편차 10.81%는 이산변수 편차 0.585%로 환산된다. 직립부의 활동에 대한 제약조건은 안전율 1.2이상이다. 안전율을 1.5로 변환시킨 것은 해의 유용영역이 감소됨을 뜻하게 된다. 문제의 설정에서 새로운 문제의 최적해는 기존 설계와 동일하거나 증가될 것을 예상할 수 있다. 이를 결과와 비교하면, 예상과 같이 새로운 문제의 목적함수 값은 0.79% 증가 됨을 확인하였다.

Case2의 경우 x_3 의 절대편차 16.6%는 이산변수 편차 0.85%로 환산된다. 직립부의 전도에 대한 제약조건은 안전율 1.2이상이다. 안전율을 1.5로 변환시킨 것은 해의 유용영역이 감소됨을 뜻하게 되며, 문제의 설정에서 새로운 문제의 최적해는 기존 설계와 동일하거나 증가될 것을 예상할 수 있다. 이를 결과와 비교하면, 예상과 같이 새로운 문제의 목적함수 값은 0.966% 증가 됨을 확인하였다.

Table 4.8 Current design and optimality evaluation

Current Design	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	$f(x^c)$	
	26.269	11.344	1.794	8.051	0.918	5.007	726.319	
New Design	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	$f(x^*)$	α
Case 1	26.503	11.549	1.619	8.051	0.918	5.138	731.897	0.00760
Case 2	26.269	11.858	1.538	8.044	0.918	5.007	733.400	0.00966
Case 3	26.276	11.520	1.611	8.044	0.874	5.007	722.922	0.00470
Case 4	26.276	11.432	1.714	8.059	0.918	5.138	726.006	0.00043
Case 5	26.415	11.637	1.502	8.051	0.852	5.007	725.137	0.00163
Case 6	26.072	11.206	1.940	8.533	0.947	5.007	725.607	0.00980

Case3의 경우 x_3 의 절대편차 11.36%는 이산변수 편차 0.612%로 환산된다. 사석기초부의 허용지지력에 대한 제약조건은 $50t/m^2$ 이상이다. 허용지지력을 $60t/m^2$ 로 변화시킨 것은 해의 유용영역이 증가됨을 뜻하게 되며, 문제의 설정에서 새로운 문제의 최적해는 기존 설계와 동일하거나 감소 될 것을 예상할 수 있다. 이를 결과와 비교하면, 예상과 같이 새로운 문제의 목적함수 값은 0.47% 감소 됨을 확인하였다.

Case4, Case5 그리고 Case6는 제약조건을 제거하는 것으로, 해의 유용영역이 증가됨을 뜻하게 되며, 이는 새로운 문제의 목적함수가 기존 설계와 동일하거나 감소 될 것을 예상할 수 있다. 이를 결과와 비교하면, 예상과 같이 새로운 문제의 목적함수 값이 감소 됨을 확인하였다.

5. 요약 및 결론

케이스 구조계에서 현장조건의 변화나 구조물의 성능개선에 따른 새로운 환경에 대하여 기존설계의 최적성 평가 기법이 필요하다. 이를 위해 케이스 구조계의 대표적인 구조물인 케이스 혼성방파제에 대한 최적설계문제를 정식화하고, 이를 최적설계 표준 모형으로 정의하였다.

그리고 최적성 평가 과정을 고찰하여 수학적 최적성 규준법과 수치적 최적화기법을 논의하였다. 최적성을 평가할 때에 기존설계의 설계변수, 목적함수, 제약함수 그리고 제약함수의 라그랑지 승수 등에 대한 정보가 가용하다면 수학적 최적성 규준법을 이용할 수 있다. 하지만, 일반적으로 최적성 평가를 할때에는 기존설계의 설계변수, 목적함수 그리고 제약함수에 관한 정보만 가용하거나, 또는 설계변수만을 아는 경우도 있다. 그래서 수학적 최적성 규준법을 이용하는 것은 현실적인 방법이라 할 수 없다. 그러나 수치적 최적화 기법은 설계변수의 정보만 필요하므로 현실적으로 유용한 방법이다. 그래서 수치적 최적화 기법 중 그 수렴성 및 효율성이 검증된 메트로폴리스 유전알고리즘을 이용하여 최적성 평가 과정과 방법을 제시하였다. 또한 최적성을 평가하기 위해 최적성 지수를 도입하였다.

수치예제에서 사용 된 최적성 평가 대상의 기존설계로는 최적설계 표준모형을 이용하였다. 설계 조건이 바뀐 새로운 설계 문제는 목적함수와 제약조건이 한계가 변화되거나 제약조건이 제거되어 만들어졌다. 본 연구에서 제시한 최적성 평가기법을 사용하여 기존 설계의 최적성을 평가해 본 결과, 목적함수 및 유용영역이 변화된 새로운 설계문제에서 최적성을 판정할 수 있었다. 그리고 이론적 예측과 일치하여 제시된 평가 기법이 적용성을 가짐을 보였다.

후 기

본 연구는 (주)삼성건설의 지원으로 수행된 연구결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 류연선, 임오강, 박경진(1994), **최적설계입문**, 반도출판사
2. 박균빈(2003), **메트로폴리스 유전알고리즘을 이용한 구조물의 설계최적화**, 부경대학교 석사 학위논문
3. 김용균(2002), **항만용어사전**, 청문각
4. 안수한, 강관원(1998), **항만공학**, 동명사
5. 서경민, 류연선, 류청로(1992), "ALM알고리즘을 이용한 혼성방파제의 최적단면설계에 관한 연구", 대한토목학회 논문집, 제12권 제1호, pp. 197~265
6. Metropolis, N. et al(1953), "Equation of State Calculations by Fast Computing Machines", J. of Chem. Physics, 21. pp. 1087~1092
7. 김여근, 윤복식, 이상복(2000), **메타 휴리스틱**, 영지문화사
8. 진강규(2000), **유전알고리즘과 그 응용**, 교우사.