

철근콘크리트 박스형 암거의 최적 및 자동화 설계

Optimum and Automation Design of Reinforced Concrete Box Culvert

김 종 옥* (공주대) · 김 한 중 (서울대)

Kim, Jong Ok · Kim, Han Jung

Abstract

In this study, Computer programs for the optimum and automation design of reinforced concrete box culvert were developed. It was shown that even though the starting points and optimization method are different, the objective function and optimum design variables converge to a value within a close range respectively, and consequently the optimum design program developed in this study is reliable and strong .

3D-design drawing can be drawn using automation design computer program developed in this study

I. 서론

지금까지의 일반적인 농업토목구조물 설계과정을 살펴보면 어떤 농업토목구조물을 설계하고자 할 때 설계자는 자기가 지니고 있는 농공학적 지식과 경험을 토대로 직관에 의해 해당 농업구조물의 주요 단면치수나 철근량 등과 같은 설계변량을 가정하고 이것이 구조물의 안정과 안전에 요구되는 구조공학적 요구조건, 시방서상의 제반 요구조건, 그리고 사용성에 대한 요구조건들을 검토하여 이들 조건을 모두 만족하는 몇가지의 유용 설계안을 마련한 후 그중에서 건설비용이 가장 적게 소요되는 설계안을 최종설계로 채택하는 방법을 사용하고 있다. 그러나 이와같은 설계방법은 다음과 같은 세가지의 큰 문제점을 내포하게 된다.

첫째로 설계에서 결정되어야 할 구조물의 치수, 철근량등으로 이루어지는 설계변량의 조합을 적절히 가정하는데 풍부한 농공학적 지식과 설계경험이 요구되고, 둘째로 구조해석과 설계변량을 수정해가는 과정을 반복하는데 많은 노력과 시간이 요구되며, 셋째로 설계요구조건을 모두 만족하는 경우의 수는 무수히 많기 때문에 불과 몇가지 경우의 설계안 중에서 건설경비가 가장 적게 소요되는 것으로 결정된 설계안이 최적의 설계안이란 보장이 없게 된다. 이와 같은 문제점들은 최적설계법을 도입함으로써 모두 해결될 수 있다.

구조물의 최적설계법이란 설계하고자 하는 구조물의 설계변수 값을 가정하여 입력하면 그 구조물에 요구되는 제반 제약조건을 모두 만족하면서 건설경비를 최소화할 수 있도록 설계변수의 값이 자동적으로 변화되는 과정이 몇차례 반복된 후 최종적으로 최적의 설계값을 얻게 되는 설계방법이다.

그러나 이와 같은 방법으로 최적의 설계값을 구했다 하더라도 설계가 완성되려면 설계도면을 작성하여야 한다.

최근 컴퓨터의 활용이 증대됨에 따라 이와 같은 업무의 자동화에 대한 요구와 수요가 폭발적으로 증대되고 있고 이 분야에 대한 연구가 수행되고 있지만 농업토목구조물의 설계자동화를 위한 범용화된 시스템은 없는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 대표적인 농업토목구조물인 철근콘크리트 박스형 암거를 대상으로 최적의 설계값을 얻을 수 있는 최적설계 프로그램과 설계도면을 자동으로 작성할 수 있는 프로그램을 개발하고자 한다.

II. 최적설계 문제의 정식화

1. 설계조건

최적설계의 대상 암거는 1련식 상자형 암거로 잡았으며 암거내폭, 암거내측높이, 흙덮기 총두께, 포장두께, 지하수위높이, 현치저폭, 현치고등은 암거를 매설하고자 하는 현장의 조건과 설계하고자 하는 암거의 규모에 따라서 설계자가 미리 결정하여 컴퓨터프로그램에 입력하도록 하였다.

2. 설계변수

설계변수는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 6개로 구성하였다.

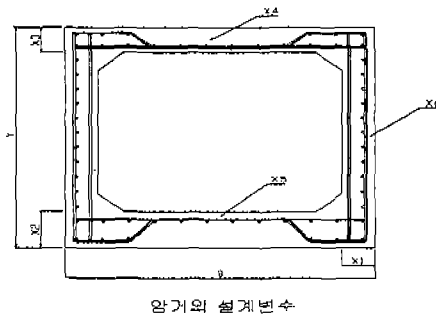


Fig. 1 Design variables of reinforced concrete box culvert

3. 목적함수

목적함수는 단위길이(1m)의 암거를 설치하는데 소요되는 콘크리트, 철근, 거푸집에 대한 재료비 및 노임을 포함하는 총 건설경비로 잡았으며 식 (1)과 같다.

$$C_{cul} = C_c V_c + C_s V_s + C_f A_f \quad (1)$$

여기서, C_{cul} : 암거의 단위길이(1m)당 건설경비

C_c : 콘크리트의 단위체적당 경비

C_s : 철근의 단위체적당 경비

C_f : 거푸집의 단위면적당 경비

V_c : 암거의 단위길이당 콘크리트의 체적

V_s : 암거의 단위길이당 철근의 체적

A_f : 암거의 단위길이당 거푸집의 면적

4. 제약조건식

가. 정판의 설계를 위한 제약조건식

1) 휨설계

정판의 가로방향을 10등분하여 각 구간의 중앙점에서 극한휨강도와 공칭휨강도를 계산하여 휨설계에 대한 제약조건식을 유도하였다.

$$G(I) = M_{usi} - \phi_f M_{nsi} \leq 0 \quad (2)$$

여기서, M_{usi} : 정판의 i 단면에서 극한휨강도

ϕ_f : 강도감소계수

M_{nsi} : 정판의 i 단면에서 공칭휨강도

I : 1~10

i : 1~10

2) 최소철근비에 대한 제약조건식

$$G(11) = P_{min} - P_s \leq 0 \quad (3)$$

여기서, P_{min} : 최소철근비

P_s : 정판의 철근비

3) 최대철근비에 대한 제약조건식

$$G(12) = P_s - P_{max} \leq 0 \quad (4)$$

여기서, P_{max} : 최대철근비

4) 전단설계

정판의 전단설계를 위해서는 정판모서리와 정판의 헨치가 끝나는 위치에서의 극한전단강도와 공칭전단강도를 구하여 제약조건식을 유도하였다.

$$G(13) = S_{us1} - \phi_v S_{ns1} \leq 0 \quad (5)$$

여기서, S_{us1} : 정판 모서리에서 극한전단강도

ϕ_v : 강도감소계수

S_{ns1} : 정판 모서리에서 공칭전단강도

$$G(14) = S_{us2} - \phi_v S_{ns2} \leq 0 \quad (6)$$

여기서, S_{us2} : 정판의 헨치가 끝나는 위치에서 극한전단강도

S_{ns2} : 정판의 헨치가 끝나는 위치에서 공칭전단강도

나. 저판의 설계를 위한 제약조건식

1) 휨설계

저판의 가로방향을 10등분하여 각구간의 중앙점에서 극한휨강도와 공칭휨강도를 계산하여 휨설계에 대한 제약조건식을 유도하였다.

$$G(I) = M_{ubi} - \phi_f M_{nbi} \leq 0 \quad (7)$$

여기서, M_{ubi} : 저판의 i 단면에서 극한휨강도

M_{nbi} : 저판의 i 단면에서 공칭휨강도

I : 15~24

i : 1~10

2) 최소철근비에 대한 제약조건식

$$G(25) = P_{\min} - P_b \leq 0 \quad (8)$$

여기서, P_b : 저판의 철근비

3) 최대철근비에 대한 제약조건식

$$G(26) = P_b - P_{\max} \leq 0 \quad (9)$$

4) 전단설계

저판의 전단설계를 위해서는 저판모서리와 저판의 현치가 끝나는 위치에서 극한전단강도와 공칭전단강도를 구하여 제약조건식을 유도하였다.

$$G(27) = S_{ub1} - \phi_v S_{nb1} \leq 0 \quad (10)$$

여기서, S_{ub1} : 저판 모서리에서 극한전단강도

S_{nb1} : 저판 모서리에서 공칭전단강도

$$G(28) = S_{ub2} - \phi_v S_{nb2} \leq 0 \quad (11)$$

여기서, S_{ub2} : 저판의 현치가 끝나는 위치에서 극한전단강도

S_{nb2} : 저판의 현치가 끝나는 위치에서 공칭전단강도

다. 측벽의 설계를 위한 제약조건식

1) 휨설계

측벽의 높이를 10등분하여 각 구간의 중앙점에서 극한휨강도와 공칭휨강도를 계산하여 휨설계에 대한 제약조건식을 유도하였다.

$$G(I) = M_{uvi} - \phi_f M_{nvi} \leq 0 \quad (12)$$

여기서, M_{uvi} : 측벽의 i 단면에서 극한휨강도

M_{nvi} : 측벽의 i 단면에서 공칭휨강도

I : 29 ~ 38

i : 1 ~ 10

2) 최소철근비에 대한 제약조건식

$$G(39) = P_{\min} - P_w \leq 0 \quad (13)$$

여기서, P_w : 측벽의 철근비

3) 최대철근비에 대한 제약조건식

$$G(40) = P_w - P_{\max} \leq 0 \quad (14)$$

4) 전단설계

측벽의 전단설계를 위해서는 측벽의 높이를 10등분하여 각 구간의 중앙점에서 극한전단강도와 공칭전단강도를 구하여 제약조건식을 유도하였다.

$$G(I) = S_{uvi} - \phi_v S_{nvi} \leq 0 \quad (15)$$

여기서, S_{uvi} : 측벽의 i 단면에서 극한전단강도

S_{nvi} : 측벽의 i 단면에서 공칭전단강도

I : 41 ~ 50

i : 1 ~ 10

5) 축방향 강도에 대한 제약조건식

$$G(51) = P_{uw} - \phi_c P_{nw} \leq 0 \quad (16)$$

여기서, P_{uw} : 축벽의 극한축방향강도

P_{nw} : 축벽의 동칭축방향 강도

ϕ_c : 강도감소계수

6) 벽체의 최소철근비에 대한 제약조건식

시방서 규정에 의하여 벽체의 최소철근비에 대한 제약조건식을 다음과 같이 유도하였다.

$$G(52) = P_{w, min} - P_w \leq 0 \quad (17)$$

여기서, $P_{w, min}$: 시방서에서 규정하고 있는 벽체의 최소철근비

III. 최적설계 결과

앞에서 정식화된 최적설계문제에 따라 컴퓨터프로그램을 개발하였으며 개발된 컴퓨터프로그램에 의하여 암거내폭, 암거내측 높이, 흙덮기 총두께, 포장두께, 지하수위 높이, 토양의 내부마찰각 및 하중 등과 같은 Parameter값을 바꾸어가면서 최적설계를 수행하였다.

그중의 한 예로서 크기가 250cm×250cm 이고 흙덮기 총 두께가 300cm인 경우에 대한 최적설계결과를 제시해보면 Table 1과 같다

Table 1 The result of optimum design of reinforced concrete box culvert

Des. Var.	Dim.	X_L	Initial Value	X_U	Optimum Design Variables			Remarks
					MMFD	SLP	SQP	
X_1	cm	10.0	25.0	500.0	32.3284	32.3417	32.3402	
X_2	cm	10.0	25.0	500.0	47.5049	47.5258	47.5110	
X_3	cm	10.0	25.0	500.0	35.4082	35.5149	35.4104	
X_4	cm ² /m	0.0	15.27	500.0	14.1905	14.2420	14.2123	
X_5	cm ² /m	0.0	15.27	500.0	18.9674	18.9121	18.9076	
X_6	cm ² /m	0.0	15.27	500.0	14.4562	14.4366	14.4465	
Obj. Func.	Won				8.87569E+05	8.87973E+05	8.87568E+05	
No. of Iteration					8	7	7	
No. of Function Evaluation					69	50	58	

IV. 설계도면 작성의 자동화

최종적인 설계도면의 제원은 본 연구에서 개발된 컴퓨터프로그램에 의하여 구한 최적설계값과 기존의 설계예를 참고로 하여 도출하였다. 이와같이 도출된 설계도면의 제원을 입력받아 설계도면을 3차원으로 작성할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 3D도면은 Auto CAD의 Auto - Lisp을 이용하였으며, 3D 도면을 이용하여 평면도, 입면도, 측면도등은 물론이고 어떤 방향의 단면도도 작성할 수 있도록 하였다.

1. 3D 도면으로부터 2D 도면의 작성

시공시에는 3D 도면을 직접 이용할 수도 있지만 시공기술자와 설계자의 필요에 따라 2D 도면을 작성해야 할 때가 있게된다. 이러한 경우에 이 시스템을 활용할 수 있도록 하기 위해서 수치와 요소간의 관계를 좌표계별로 표시해 주었다. 이를 이용하면 사용자와 간단한 Interactive를 도입함으로써 구조물에 대한 2D화된 단면도를 쉽게 자동적으로 작성할 수 있게 된다.

2. 3차원 도면 작성예

개발된 설계도면 작성 프로그램에 의하여 작성된 3차원 설계도면의 예를 제시하면 Fig. 2와 같다.

V. 결과 분석 및 고찰

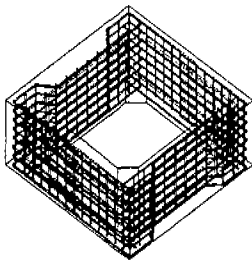


Fig. 2 Example of 3D-design drawing

1. 최적설계 결과의 신뢰성

본 연구에서 개발된 컴퓨터 프로그램에 의하여 구한 최적설계값의 신뢰성을 확인하기 위하여 10가지의 설계변수 초기값에 의하여 최적설계값을 구해 본 결과 모두 거의 동일한 값으로 수렴하였다. 또한 적용된 3가지의 최적화기법에 의한 최적설계값 사이의 차이도 아주 미미하였다. 따라서 본 연구에서 개발된 컴퓨터 프로그램은 신뢰성이 높은 것으로 판단된다.

2. 효율성

Table 1에서 보는 바와 같이 어떤 최적화 기법을 사용하던 8회 이내에 최적설계값에 수렴하였으며 함수 계산 횟수도 70회 이내이었다. 따라서 본 연구에서 개발된 컴퓨터 프로그램은 최적설계값을 구하는데 아주 효율적인 것으로 판단된다.

3. 적용가능성

본연구에서 수행된 최적설계 결과치에 대하여 구조해석을 수행해본 결과 구조공학적으로 안전하였고 시방서의 제반 조건도 모두 만족하였다. 따라서 본 컴퓨터프로그램은 실제 암거의 설계에 적용 가능한 것으로 판단된다.

4. 설계도면 작성 자동화 프로그램의 활용

설계도면 작성 자동화 프로그램을 이용하면 암거의 설계제원만 입력하면 어떠한 크기의 암거에 대해서도 3차원의 설계도면이 작성된다. 그리고 3차원 설계도면이 작성되면 어떠한 방향의 단면도도 쉽게 구할 수 있게 된다. 즉 과거의 평면도, 정면도, 입면도 등으로 도식화된 설계도면에서 벗어나 어떠한 방향의 단면도도 구할 수 있는 입체적인 설계도면을 작성할 수 있게 된다. 따라서 이 프로그램을 이용하면 구조물의 전체적인 형상도 볼 수 있고 원하는 단면의 세부적인 상세도도 볼 수 있기 때문에 구조물의 설계와 시공에 효율적으로 활용될 수 있을 것이다.

VI. 결론

본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 본 연구에서는 철근콘크리트 박스형 암거의 최적설계를 수행할 수 있는 컴퓨터 프로그램과 3차원 설계도면의 작성을 자동화 할 수 있는 프로그램이 개발되었다.
2. 본 연구에서 개발된 최적설계프로그램을 이용하면 신뢰성이 있는 최적설계값을 구할 수 있는 것으로 판단되었다.
3. 최적설계프로그램은 효율적이었으며 이 프로그램으로 구한 최적설계값은 실제 설계에 적용 가능한 것으로 판단되었다.
4. 설계도면 작성 자동화 프로그램을 이용하면 어떤 규모의 암거에 대해서도 입체적인 도면과 함께 어떤 방향의 단면도도 구할 수 있으므로 설계와 시공에 편리하게 이용될 수 있다.

참고문헌

1. Haftka, R. T. , Gurdal, A. and Kamat, M.T., Elements of Structural Optimization, Kluwer Academic Publishers, 1990.
2. Karihaloo, B. L., Most Efficient NLP Techniques in Optimum Structural Frame Design, Engineering Optimization, Vol.20, No. 4, 1993, pp. 261-272.
3. Vanderplaats, G. N., Numerical Optimization Techniques for Engineering Design : with Application, McGraw-Hill, 1998.
4. Vanderplaats, G. N., Efficient Structural Optimization Techniques, Proceedings of the Fourth International Conference on Computing in Civil and Building Engineering, July 29-31, 1991, Tokyo, Japan.
5. Vanderplaats, G. N., Thirty Years of Modern Structural Optimization, Advances in Engineering, Software, 16, 1993, pp. 81-88.