

농업용 수로터널의 최적 설계

Optimum Design of Agricultural Aqueduct Tunnel

김 종 옥 (공주대)

Kim, Jong Ok

Abstract

In this study, computer program for the optimum design of agricultural aqueduct tunnel was 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 robust.

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

I. 서론

지금까지의 일반적인 농업토목구조물 설계과정을 살펴보면 설계자가 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 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.

그리고 농업토목구조물의 경우 일반구조물에 비하여 소규모이고 파괴시 위험부담이 적기 때문에 실제 설계의 경우 과거 농수산부와 농어촌진흥공사에서 발간하여 보급한 농지개량사업 표준설계도면 중에서 설계하고자 하는 농업구조물의 규모와 가장 유사한 도면을 참조하여 설계하고 있다.

이와같이 설계할 경우 표준설계도면이 과거의 시방서를 기준으로 작성되었기 때문에 현행 시방서의 설계 원칙과 기준에 위배되고 또 구조물을 설치하고자 하는 곳의 지형과 구조물의 규모에 알맞는 최적의 설계를 할 수 없게된다.

이와 같은 문제점들을 모두 해결할 수 있는 방법은 최적설계법을 도입하는 것이다.

구조물의 최적설계법이란 설계하고자 하는 구조물의 설계변수값을 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.

수로터널의 경우 단면의 형상이 특수하기 때문에 수로터널 각 위치에서 단면력을 구하기가 복잡할 뿐 아니라 단면 각부의 두께나 철근량을 결정하는 것도 단순하지가 않다.

따라서 본 연구에서는 농업용 수로터널을 대상으로 최적의 설계값을 얻을 수 있는 최적설계 프로그램을 개발하고자 한다.

II. 최적설계 문제의 정식화

1. 설계조건

수로터널을 설치하고자 하는 위치의 지형과 지질 그리고 용수량 등을 고려하여 결정하게 되는 터널의 형상과 크기에 관련되는 제반 parameter들은 설계자가 미리 결정하여 컴퓨터 프로그램에 입력하되로서 현장조건에 알맞는 수로터널의 최적설계가 수행되도록 프로그램을 개발하였다.

2. 설계변수

설계변수는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 8개로 구성하였으며 각 설계변수의 구체적인 내용은 다음과 같다.

X_1 : 터널 정부의 콘크리트 두께

X_2 : 터널 바닥부의 콘크리트 두께

X_3 : 터널의 정부에서 터널 종방향 길이 1m당 터널 외측에 배근해야할 철근단면적

X_4 : 터널의 정부에서 터널 종방향 길이 1m당 터널 내측에 배근해야할 철근단면적

X_5 : 터널의 측벽에서 터널 종방향 길이 1m당 터널 외측에 배근해야할 철근단면적

X_6 : 터널의 측벽에서 터널 종방향 길이 1m당 터널 내측에 배근해야할 철근단면적

X_7 : 터널의 바닥부에서 터널 종방향 길이 1m당 터널 외측에 배근해야할 철근단면적

X_8 : 터널의 바닥부에서 터널 종방향 길이 1m당 터널 내측에 배근해야할 철근단면적

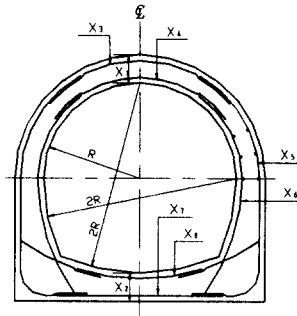


Fig. 1 Design variables of agricultural aqueduct tunnel

3. 목적함수

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

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

- 여기서, C_{tun} : 수로터널 단위길이(1m)당 건설경비
 C_e : 단위체적의 굴착에 소요되는 경비
 C_c : 콘크리트의 단위체적당 경비
 C_s : 철근의 단위체적당 경비
 C_f : 거푸집의 단위면적당 경비
 V_e : 수로터널 단위길이당 굴착체적
 V_c : 수로터널 단위길이당 콘크리트의 체적
 V_s : 수로터널 단위길이당 철근의 체적
 A_f : 수로터널 단위길이당 거푸집의 면적

4. 제약조건식

수로터널 단면중 구조적으로 중요한곳 7군데를 각종 단면력의 계산점으로 택하여 이들 계산점에서 각종 제약조건식을 유도하였다.

가. 휨설계

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

- 여기서, M_{ui} : 계산점 i에서 극한휨강도
 M_{ni} : 계산점 i에서 공칭휨강도
 ϕ_f : 강도감소계수

나. 전단설계

$$G(I) = S_{ui} - \phi_v S_{ni} \leq 0 \quad (3)$$

- 여기서, S_{ui} : 계산점 i에서 극한전단강도
 S_{ni} : 계산점 i에서 공칭전단강도
 ϕ_v : 강도감소계수

다. 축방향강도에 대한 제약조건식

$$G(I) = P_{ui} - \phi_p P_{ni} \leq 0 \quad (4)$$

- 여기서, P_{ui} : 계산점 i에서 극한축방향강도
 P_{ni} : 계산점 i에서 공칭축방향강도
 ϕ_p : 강도감소계수

라. 최소철근비에 대한 제약조건식

최소철근비는 터널외측의 경우에는 0.10%, 터널내측의 경우에는 0.15%를 기준으로하여 각 계산점에서 제약조건식을 유도하였다.

$$G(I) = P_{\min} - P_i \leq 0 \quad (5)$$

여기서, P_{\min} : 최소철근비
 P_i : 계산점 i에서 철근비

마. 터널의 최소 벽두께에 대한 제약조건식

라이닝의 최소두께는 $D_i/30$ (D_i 는 터널내공단면의 지름)로 잡았으며 최소 10cm 이하가 되어서는 안되는 것으로 보아 제약조건식을 유도하였다.

$$G(I) = T_{\min} - T_i \leq 0 \quad (6)$$

여기서, T_{\min} : 라이닝의 최소 두께
 T_i : 계산점 i에서 라이닝의 두께

바. 최대철근비에 대한 제약조건식

최대철근비는 균형철근비의 75%로 보아 터널의 내·외측 철근에 대하여 제약조건식을 유도하였다.

$$G(I) = PI_i - P_{\max} \leq 0 \quad (7)$$

$$G(J) = PO_i - P_{\max} \leq 0 \quad (8)$$

여기서, PI_i : 계산점 i의 내측 철근비
 PO_i : 계산점 i의 외측 철근비
 P_{\max} : 최대철근비

III. 컴퓨터 프로그램 개발

앞에서 정식화 된 수로터널의 목적함수와 제약조건식에 대한 Computer Program을 개발하여 DOT 또는 VisualDOC과 연결하여 이들의 최적설계 값을 구할 수 있도록 하였다. 개발된 프로그램은 설계하고자 하는 수로터널의 규모, 현장의 조건, 설계하중 및 각종 상수등과 같은 설계 조건만 입력되면 이들 설계조건을 모두 만족하면서 가장 경제적인 설계치가 자동적으로 구해지도록 구성되어 있다.

DOT(Design Optimization Tools)는 비선형의 제약조건을 갖는 최적화 문제나 제약조건을 갖지 않는 최적화 문제를 푸는데 사용되는 프로그램으로서 사용자가 풀고자하는 최적화 문제에 대한 설계변수의 초기치, 목적함수와 제약조건식의 값을 계산할 수 있는 Code를 제공해주면 최적화를 수행할 수 있는 프로그램이다.

IV. 최적설계 결과

개발된 컴퓨터 프로그램에 의하여 터널의 내경, 측벽의 각도등과 같이 터널의 규모와 형상을 결정짓는 parameter값을 바꾸어가면서 최적설계를 수행하였다.

그중의 한 예로서 터널의 반경 $R=1.3m$ 인 경우에 대한 최적설계 결과를 제시해 보면 Table 1과 같다

Table 1 The result of optimum design of agricultural aqueduct tunnel

Des. Var.	Dim.	X_L	Initial Value	X_U	Optimum Design Variables			Remarks
					MMFD	SLP	SQP	
X_1	m	0.100	0.2000	5.000	0.1498	0.1623	0.1430	
X_2	m	0.100	0.2200	5.000	0.2051	0.1923	0.1890	
X_3	m^2	0.000	5.068×10^{-4}	5.0×10^{-1}	1.4996×10^{-4}	1.6237×10^{-4}	1.4309×10^{-4}	
X_4	m^2	0.000	3.568×10^{-4}	5.0×10^{-1}	1.2681×10^{-3}	1.1060×10^{-3}	1.3895×10^{-3}	
X_5	m^2	0.000	4.568×10^{-4}	5.0×10^{-1}	1.3671×10^{-3}	1.1967×10^{-3}	1.5038×10^{-3}	
X_6	m^2	0.000	4.068×10^{-4}	5.0×10^{-1}	2.2482×10^{-4}	2.4356×10^{-4}	2.1505×10^{-4}	
X_7	m^2	0.000	5.068×10^{-4}	5.0×10^{-1}	2.0509×10^{-4}	1.9235×10^{-4}	1.8962×10^{-4}	
X_8	m^2	0.000	11.50×10^{-4}	5.0×10^{-1}	1.2998×10^{-3}	1.6177×10^{-3}	1.4752×10^{-3}	
Obj. Func.	Won				1.0936×10^6	1.10012×10^6	1.09028×10^6	
No. of Iteration					16	50	7	
No. of Function Evaluation					207	473	72	

V. 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 작성에

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

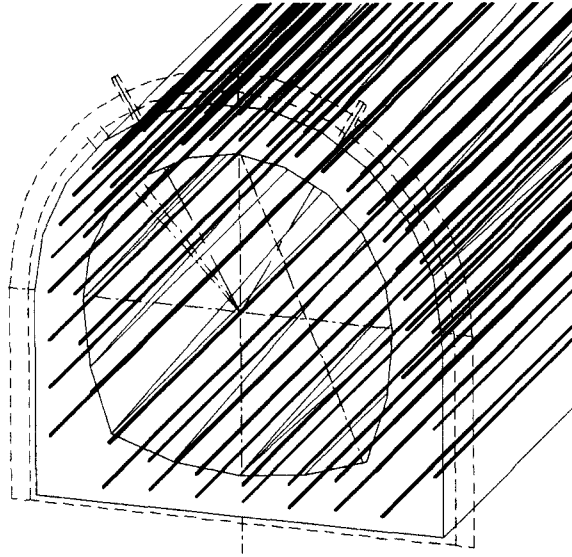


Fig. 2 3D-design drawing of agricultural aqueduct tunnel

VI. 결과 분석 및 고찰

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. 적용가능성

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

3. 설계도면 작성 자동화 프로그램의 활용

설계도면 작성 자동화 프로그램을 이용하면 수로터널의 설계제원만 입력하면 어떠한 크기의 수로터널에 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 있게된다. 따라서 이 프로그램을 이용하면 수로터널의 전체적인 형상도 볼 수 있고 원하는 단면의 세부적인 상세도도 볼 수 있기 때문에 구조물의 설계와 시공에 효율적으로 활용될 수 있을 것이다.

Ⅶ. 결론

본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 본 연구에서는 수로터널의 최적설계를 수행할 수 있는 컴퓨터 프로그램과 3차원 설계도면의 작성을 자동화 할 수 있는 프로그램이 개발되었다.
2. 본 연구에서 개발된 최적설계프로그램을 이용하면 수로터널에 대한 신뢰성이 있는 최적설계 값을 구할 수 있는 것으로 판단되었다.
3. 최적설계프로그램으로 구한 최적설계값은 실제 설계에 적용 가능한 것으로 판단되었다.
4. 설계도면 작성 자동화 프로그램을 이용하면 어떤 규모의 수로터널에 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.