

효율적인 재해석 기법에 의한 RC 교각의 최적설계

Optimization of RC Piers Based on Efficient Reanalysis Technique

조효남* 민대홍** 신만규***
Cho, Hyo-Nam Min, Dae-Hong Shin, Man-Kyu

요약

본 연구에서는 지진하중을 받는 RC 교각 효율적인 최적설계 알고리즘을 제안하였다. 새로운 RC 교각 최적설계 알고리즘은 효율적인 강도재해석 기법을 기초로 하고 있다. 또한 RC 교각의 특성을 고려하여 제약조건 소거기법이 도입되었다. 수치예제를 통하여 제안한 강도재해석기법에 의한 새로운 알고리즘이 기존의 알고리즘에 비해 효율성과 신뢰도가 우수하다는 것을 입증하였다.

ABSTRACT

In this study, an optimum design algorithm using efficient reanalysis is proposed for seismic design of RC Piers. The proposed algorithm for optimization of RC Piers is based on efficient reanalysis technique. Considering structural behavior of RC Piers, several other approximation techniques, such as artificial constraint deletion is introduced to increase the efficiency of optimization. The efficiency and robustness of the proposed algorithm including the proposed reanalysis technique is demonstrated by comparing it with a conventional optimization algorithm. A few of design examples are optimized to show the applicability of the proposed algorithm.

핵심용어 : 최적화 알고리즘, 제약조건 소거기법, 효율적인 재해석 기법, RC 교각

KEYWORDS : optimization algorithm, artificial constraint deletion, efficient reanalysis technique, RC Pier

1. 서론

RC 교각은 일반적인 교량의 교각 형식 중에서 가장 많이 적용되는 형식이다. 그럼에도 불구하고 효율적인 최적설계 부재로 교각의 내진설계시에 단면의 과다 설계 등으로 인해 효율적인 설계를 수행하지 못하고 있다. 더욱이 지진 해석시에는 상당량의 해석 시간과 비용이 소요된다. 따라서 효율적인 최적설계의 필요성이 요구되고 있다. 이와 관련된 최근의 연구 동향을 살펴보면, Kwak & Choi(1996)⁽³⁾는 이산화된 데이터 베이스를 통해 두 단계의 최적화를 통한 기둥의 최적단면을 찾는 연구를 하였고, Mnickarajah & Xie(1999)⁽⁶⁾는 좌굴 하중을 받는 기둥에 대해서 eigenvalue에 대한 민감도를 이용한 최적설계 알고리즘을 제안하였다. 그러나 이러한 연구들은 여러 단계의 최적화를 거치고, 민감도를 분석하는데 있어서 상당한 시간과 비용이 소요된다. 따라서 본 논문에서는 RC 교각의 구조적 특성을 고려하여 설계 민감도를 이용하지 않는 재해석 기법을 이용한 효율적인 최적설계 알고리즘을 개발하고자 하였다.

* 정회원, 한양대학교 토목·환경공학과 교수

** 정회원, 한양대학교 토목·환경공학과 박사과정

*** 정회원, 한양대학교 토목·환경공학과 석사과정

2. 최적설계 문제의 정식화

2.1 설계변수

대상구조물인 RC 교각은 현재 다양한 형식이 설계 및 시공되고 있다. 하지만 본 연구에서는 제한한 최적설계 알고리즘의 성능을 평가하기 위하여 가장 보편적인 형식의 사각 단면 교각을 선정하였으며, 이에 따른 설계 변수는 그림 1에 나타난 바와 같이 목적함수인 제작비용에 가장 민감한 단면치수와 철근량을 선정하였다.

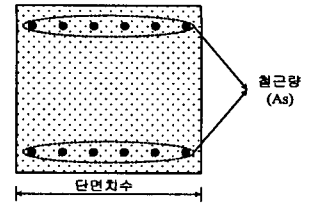


그림 1 콘크리트 교각 단면의 설계변수

2.2 목적함수

본 연구에서는 RC 교각의 제작비용을 목적함수로 정하였다. 제작비용의 정확한 이론적인 추정은 간단하지 않지만 제작비용이 구조물의 중량에 비례한다는 설계실무의 관행을 바탕으로 RC 교각의 목적함수를 다음 식과 같이 제작비용의 함수로 정식화하였다.

$$F(X) = C_C V_C + C_R W_R \quad (1)$$

여기서, $F(X)$ = RC 교각의 비용함수; C_C = 콘크리트의 단위부피당 비용(만원/m³); V_C = 콘크리트의 부피(m³); C_R = 철근의 단위중량당 비용(만원/ton); W_R = 철근의 중량(ton)

2.3 제약조건

2.3.1 RC 교각에 대한 제약조건

RC 교각 설계에 사용되는 제약조건은 도로교설계기준⁽⁷⁾과 콘크리트구조설계기준⁽⁶⁾의 강도설계법을 기준으로 표 1과 같이 정식화하였다.

표 1 콘크리트 교각의 제약조건

구분	설계제약조건	기호설명
축 강도	$G_1 = \frac{P_u}{\phi P_n} - 1 \leq 0$	<ul style="list-style-type: none"> P_u : 계수 축하중 강도 P_n : 공칭 축하중 강도 ϕ : 강도감소계수
휨 강도	$G_2 = \frac{M_u}{\phi M_n} - 1 \leq 0$	<ul style="list-style-type: none"> M_n : 공칭 모멘트 M_u : 계수 모멘트 ϕ : 강도감소계수
최대철근비	$G_3 = \frac{\rho}{\rho_{max}} - 1 \leq 0$	<ul style="list-style-type: none"> ρ : 사용철근비 ρ_{max} : 최대철근비 = $0.75 \times \beta_1 \times 0.85 \cdot \left(\frac{f_{ck}}{f_y} \right) \cdot \left(\frac{6000}{6000 + f_y} \right)$
최소철근비	$G_4 = \frac{\rho_{min}}{\rho} - 1 \leq 0$	<ul style="list-style-type: none"> ρ : 사용철근비 ρ_{min} : 최소철근비 = $\frac{0.80\sqrt{f_{ck}}}{f_y}$, $\frac{14}{f_y}$ 중 큰 값
변 위	$G_5 = \frac{\delta}{\delta_{all}} - 1 \leq 0$	<ul style="list-style-type: none"> δ : 실제변위 δ_{all} : 허용변위

3. RC 교각의 최적설계 기법 및 알고리즘

3.1 유효제약조건 선택

대부분의 RC 교각 설계에서 변위에 대한 제약조건이 비지배적이다. 따라서 이러한 구조적 특성을 효과적으로 이용하기 위하여 강도제약조건과 변위제약조건을 분리하는 제약조건 소거기법을 사용하였다. 즉, 우선 강도제약조건만을 이용하는 최적설계를 수행하고 변위는 그 만족여부를 확인하여 만족하지 않으면 변위제약조건을 포함하는 최적설계를 수행하도록 하였다.

3.2 근사화된 재해석 기법

RC 교각의 최적설계에서는 지진하중에 대한 고려가 있어야 하고, 제약조건은 부등제약조건식으로 표현되며 대부분의 제약조건이 구조해석을 필요로 하는 설계변수에 음함수(Implicit Function)로 표현되어 있다. 따라서 기존의 재해석 기법을 고찰하고 RC 교각에 효율적인 재해석 기법을 제안하였다.

3.2.1 기존의 재해석 기법

기존의 구조물에 대한 최적설계에서는 구조재해석시 변위에 대한 설계 민감도 해석을 이용하는 근사화 기법을 식 (2)와 같이 사용하였다. 또한 이러한 변위행렬을 이용하여 단면력을 산출하고 강도에 대한 근사적 재해석도 식 (3)과 같이 사용하였다.

$$\{r\} \approx \{r^*\} + [\nabla r_x^*](\{X\} - \{X^*\}) \quad (2)$$

$$\{Q\} \approx \{Q^*\} + [\nabla Q_x^*](\{X\} - \{X^*\}) \quad (3)$$

여기서, $\{r\}$, $\{Q\}$ = 다음 설계점에서의 변위와 강도; $\{r^*\}$, $\{Q^*\}$ = 현재 설계점에서의 변위와 강도; $[\nabla r_x^*]$, $[\nabla Q_x^*]$ = 현 설계점에서 변위와 강도에 대한 민감도를 나타내는 구배행렬

이와 같은 근사화 재해석 방법은 하중조건이 수가 적고 소형 구조물의 경우 적은 계산비용으로 최적설계를 수행할 수 있으나 대형 구조물의 최적설계에서는 민감도 해석이 어렵거나 계산 비용이 많이 소요된다.

3.2.2 제안한 재해석 기법

RC 교각의 실질적인 최적설계는 각 단계마다 모든 설계변수에 대하여 강도가 검토되므로 각 단계별 강도에 대한 재해석이 필요하다. 특히 실제교각의 설계시 지진하중과 같은 하중조건은 많은 강도재해석 수를 필요로 한다. 또한 많은 수의 재해석이 필요한 RC 교각의 설계에서는 엄청난 설계민감도 해석이 필요하다. 따라서 실질적인 최적설계에서 기존의 재해석 기법은 방대한 수치해석 노력과 많은 계산비용이 필요하다. 이러한 단점을 보다 효과적으로 다루기 위하여 본 연구에서는 설계민감도해석이 필요 없는 강도에 대한 재해석 기법을 제안하고자 한다.

강도에 대한 제약조건은 식(4)에서 보는 바와 같이 소요강도와 설계강도의 함수로 구성되어 있다.

$$G(x) = \frac{Q}{R} - 1 \quad (4)$$

여기서, Q = 소요강도; R = 설계강도

식 (4)에서 소요강도(Q)는 구조해석 과정을 거쳐야 하는 음함수(Implicit Function)이고 설계강도(R)는 설계변수에 양함수(Explicit Function)로 표현된다. 설계변수변화에 따른 강도변화에 지배적인 영향을 주는 인자는 소요강도의 변화 $\partial Q/\partial X$ 보다 설계강도의 변화 $\partial R/\partial X$ 가 훨씬 더 지배적이다. 따라서 근사화된 강도 재해석 기법은 아래의 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다. 즉, 정정구조물의 최적설계와 같이 우선 구조해석결과인 소요강도를 상수로 고정하고 이에 따른 최적설계에 필요한 설계강도를 설계변수의 변화에 따른 근사화된 강도로 근접 최적점을 구한다. 그리고 이점에서 구조해석을 다시 실시하여 강도의 수렴여부를 판단한다. 이때 수렴하지 않았다면 이 재해석에서 구한 소요강도를 다시 상수로 고정하고 최적설계를 반복 수행한다. 이러한 강도 재해석방법은 설계민감도 해석이 필요 없고 설계변수에 양함수인 설계강도의 계산만을 요구한다.

$$G(x) \approx G(x^*) + Q^* \left(\frac{R^* - R}{R^* R} \right) \quad (5)$$

여기서, $G(x^*)$ = 현재 설계점에서의 강도 제약조건; Q^* = 현재 설계점에서의 소요강도; R^* = 현재 설계점에서의 설계강도; R = 다음 설계점에서의 설계강도

3.3 최적설계 알고리즘

RC 교각의 최적설계에 있어 지진하중과 제약조건이 고려되는 경우 기존의 재해석 기법이나 일반적인 최적설계 알고리즘으로는 효율적인 최적설계를 기대하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 제안한 재해석 기법에 기초한 새로운 최적설계 알고리즘을 그림 2과 같이 제안한다.

최적화 방법은 최적해의 신뢰성면에서 우수한 ALM (Augmented Lagrange Multiplier) 방법을 사용하였다. 이와 같은 알고리즘은 국부최적화기법들을 부프로그램으로 형성하고 있는 ADS (Automated Design Synthesis)⁽¹⁾를 이용하여 수행하였다.

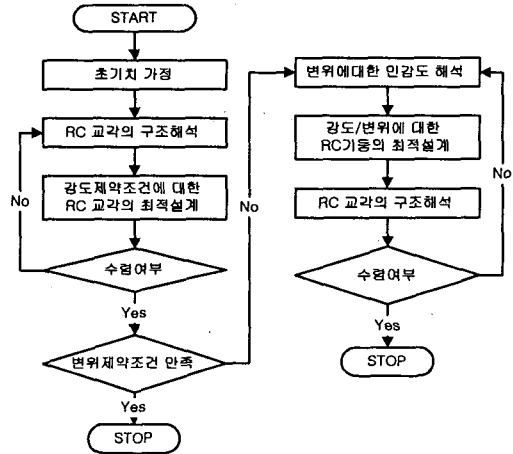


그림 2 제안한 RC 교각의 최적설계 알고리즘

4. 수치예제

RC 교각의 최적설계시 제안한 재해석 기법과 제약조건 소거기법을 사용한 최적설계 알고리즘의 효율성을 입증하기 위하여 몇 개의 교각에 대한 최적설계를 수행하였다.

4.1 일반사항

수치예제에서 사용된 대상구조물은 그림 2과 같이 3경간 연속으로 상부구조는 강상자형으로 구성되어있다. 교각의 높이는 표 3에 나타낸 것처럼 다양한 예제를 적용하였다. 적용예에 사용된 최적설계의 초기치는 단면의 치수는 250cm, 그리고 철근량은 300cm²으로 적용하였다. 단위공비는 시공방법과 제작여건에 따라 큰 차이를 나타낸다. 따라서 본 연구에서는 설계실무에서 보편적으로 사용하는 제작공비 산출방법인 도로공사 실시설계기준⁽⁹⁾을 참조하여 표 3와 같이 적용하였다. 그리고 처짐 기준으로는 도로교설계기준⁽⁷⁾의 허용변위 기준인 최소받침지지길이를 적용하였다.

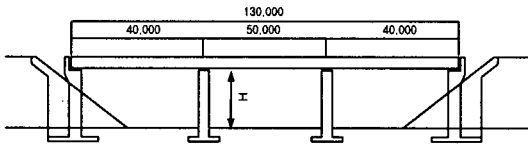
표 2 대상구조물 자원

구분	대상교량
교량형식	3경간 연속 강상자형교
교장(m)	40+50+40=130
교폭(m)	19.4
교각높이(m)	5, 10, 20, 30

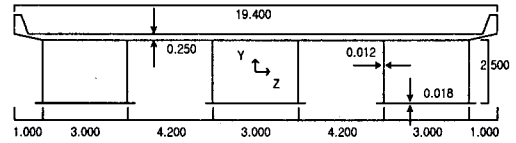
표 3 단위공비

구분	콘크리트	철근
제작공비	44.7 (만원/m ³)	165.2 (만원/ton)

지진하중에 대한 고려는 도로교설계기준⁽⁷⁾에 따라서 단일 모드 스펙트럼을 적용하기 위하여 아래 그림 4와 같이 등가정적 지진하중을 작용시켜 지진하중을 고려하였다. 지진에 대한 일반 사항은 표 4와 같다.



a) 종단면도



b) 횡단면도

그림 3 대상구조물

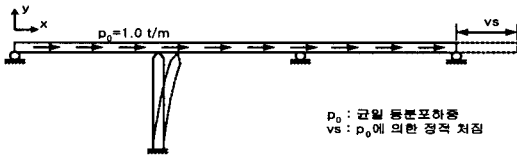


그림 4 종방향 거동 모델링

표 4 지진에 대한 일반사항

구분		대상교량
내진설계 일반사항	지진구역	I
	구역계수	0.11
	위험도 계수	1.4(재현주기 1000년)
	지반종류	Soil Type II
	지반계수(S)	1.2

4.2 결과 및 분석

일반적인 최적설계와 제안한 재해석 기법에 의한 최적설계를 수행한 결과를 표 5에 나타내었다.

표 5 3경간 연속보의 최적설계 결과

교각 높이 (m)	단면치수(cm)		철근량(cm ²)		변위(cm)		제작비용(만원)		해석횟수	
	일반적 최적설계	제안한 최적설계	일반적 최적설계	제안한 최적설계	실제변위	허용변위	일반적 최적설계	제안한 최적설계	일반적 최적설계	제안한 최적설계
5	115.32	115.32	142.42	142.43	1.85	45.45	380.87	380.87	658	4
10	107.19	107.19	298.33	298.34	7.42	48.80	863.97	863.98	1579	7
20	107.17	107.18	298.41	298.49	9.85	55.50	1728.07	1728.07	2350	8
30	107.19	107.19	298368	298.36	22.17	62.20	2592.12	2592.12	2287	8

† : 허용변위는 $N=(200+1.67L+6.66H)(1+0.000125\theta^2)$ 를 적용하였다

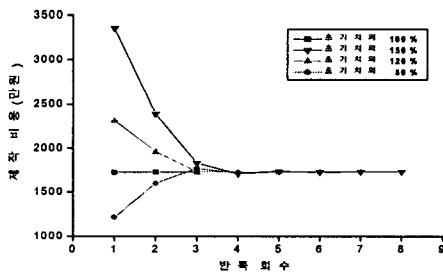


그림 5 제안한 알고리즘에 의한 목적함수의 수렴성

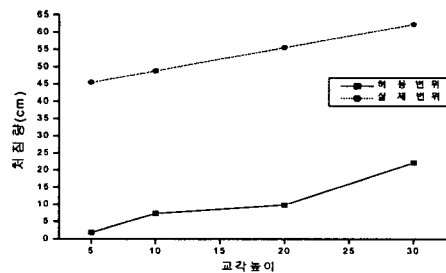


그림 6 실제변위과 허용변위

표 5에 나타난 바와 같이 일반적인 최적설계와 제안한 최적설계의 제작비용을 보면 교각 높이가 20m 인 경우 일반적인 최적설계 방법에 의한 비용은 1,728.07만원이고 제안한 최적설계 알고리즘에 의한 비용은 1,728.07만원으로 목적함수 값이 같음을 알 수 있다. 그러나 해석횟수를 보면 일반적인 최적설계

알고리즘의 경우 2,350회이나 제안한 알고리즘에 의한 해석횟수는 8회로 제안한 알고리즘이 더 효율적임을 알 수 있다. 또한 다양한 높이의 교각에 대해서도 제안한 알고리즘은 일반적인 알고리즘과 비교해서 적은 해석으로도 동일한 최적해를 준다. 따라서 제안한 알고리즘은 효율성과 신뢰성을 갖는다고 판단된다.

그림 5에 나타난 바와 같이 제안한 재해석 기법에 의한 최적설계에서 초기치를 80%~150%까지 변화 시킴에도 불구하고 안정적으로 최적해에 수렴함을 알 수 있다. 따라서 제안한 재해석 기법에 의한 최적해는 안정성을 갖는다고 판단된다. 또한 그림 6에서 보는 바와 같이 교각 높이 5m의 경우 실제변위 1.85cm로 허용변위 45.45cm에 비해 상당히 적은 처짐이 발생된 것을 알 수 있다. 즉 강도제약조건이 지배적인 제약조건으로 나타나 최적설계는 강도제약조건 최적설계만으로도 만족할 만한 결과를 얻을 수 있다. 따라서 본 연구에서 제안하는 강도제약조건 최적설계를 먼저 수행하는 제약조건 소거기법은 매우 효과적인 방법이라고 판단된다.

5. 결론

본 연구는 실질적인 RC 교각의 최적설계시 효과적인 최적설계를 수행하기 위해서 효율적인 강도 재해석 기법을 제안하고 이를 이용한 새로운 최적설계 알고리즘을 개발하였다. 제안한 재해석 기법과 RC 교각의 최적설계 알고리즘을 수치예제에 적용하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 내진해석이 필요한 실제 RC 교각의 최적설계시 일반적인 최적화방법은 매우 많은 수의 구조해석이 필요하므로 실제구조물에 적용하기가 거의 불가능하다. 하지만 본 연구에서 제안한 재해석 기법은 RC 교각의 최적설계시 신뢰성과 효율성을 가지는 매우 효과적인 최적설계를 수행할 수 있다.
- 2) RC 교각의 최적설계에 있어 강도제약조건만을 고려하여 최적설계를 수행하고, 변위제약조건을 만족여부를 확인한 후 변위제약조건에 위배되는 경우에 대해서만 변위제약조건을 포함하는 최적설계를 수행하는 제약조건 소거기법은 현행 설계기준에 근거한 RC 교각의 최적설계에서 매우 효과적인 방법이다.
- 3) 본 연구에서는 비교적 간단한 수치예제를 적용하였으나 실질적인 구조물에 제안한 알고리즘을 적용한다면 보다 효율적이고 신뢰성을 갖는 RC 교각의 최적설계를 수행 할 수 있을 것으로 본다.

참고문헌

- (1) Garrent N. Vanderplaats, ADS: A FORTRAN Program for Automated Design Synthesis, Engineering Design Optimization, Inc., Santa Barbara, California.
- (2) Garret N. Vanderplaats (1984). Numerical Optimization Techniques for Engineering Design: with Applications, McGraw-Hill, Inc.
- (3) H. G. Kwak, C. K. Choi and G. T. Chung(1996). "Direct search approach to optimum spiral column design", Engineering Structures, Volume 18, Issue 5.
- (4) Lust, R.V. and L.A.Schmit (1985), Alternative Approximation Concepts for Space Frame Synthesis, AIAA/ASME /ASCE/AHS 26th Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, pp. 333-348, April
- (5) D. Manickarajah, Y.M. Xie, G.P. Steven(1999), "Optimisation of column and frames against buckling", Computer & Structures, Volume 75, Issue 1, pp. 45-54.
- (6) 건설교통부(1999), 콘크리트구조설계기준
- (7) 한국도로교통협회(2000), 도로교설계기준
- (8) 한국도로공사(1992), 도로설계요령
- (9) 한국도로공사(1997), 실시설계기준