

효율적인 재해석 기법에 의한 철근콘크리트 교각의 최적설계

Optimization of Reinforced Concrete Piers Based on Efficient Reanalysis Technique

조효남*

민대홍**

신만규***

Cho, Hyo-Nam

Min, Dae-Hong

Shin, Man-Kyu

(논문접수일 : 2001년 4월 19일 ; 심사종료일 : 2001년 11월 28일)

요지

본 연구에서는 지진하중을 받는 철근콘크리트(Reinforced Concrete : RC) 교각의 효율적인 최적설계 알고리즘을 제안하였다. 제안한 RC 교각 최적설계 알고리즘은 효율적인 강도재해석 기법을 기초로 하고 있다. 또한 RC 교각의 특성을 고려하여 제약조건 소거기법과 같은 근사화 기법을 도입 하였다. 기존의 최적설계 방법 비교를 통해 제안한 RC 교각의 최적설계 방법의 효율성과 신뢰성을 비교하였다. 그리고 시방서의 내진 규정에 따른 수치예제를 통하여 제안한 강도재해석기법에 의한 새로운 알고리즘이 기존의 최적설계 방법에 비해 효율성과 신뢰도가 우수하다는 것을 입증하였다.

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

Abstract

In this study, an optimum design algorithm using efficient reanalysis is proposed for seismic design of Reinforced Concrete (RC) piers. The proposed algorithm for optimization of RC piers is based on efficient reanalysis technique. Considering structural behavior of RC piers, the other approximation technique 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.

Keywords : Optimum Design algorithm, Artificial Constraint Deletion, Efficient Reanalysis Technique, RC pier

1. 서론

현재 교량의 교각에 대한 설계 및 시공은 철근콘크리트 (Reinforced Concrete : RC) 구조물이 대부분이며 설계시 적용되는 하중은 사하중, 활하중 그리고 지진하중으로 이에 대한 검토가 이루어져야한다. 또한,

오류가 없고 경제적인 설계를 위해서는 최적설계가 필수적이다. 이러한 내진설계를 포함하는 RC 교각에 대한 최적설계에서 해석방법은 단일모드 스펙트럼, 복합모드 스펙트럼 그리고 시간이력 해석 등과 같은 방법을 사용하고 있는데 기존의 최적설계 방법으로는 이러한 해석을 엄청나게 많이 수행해야하므로 그 효율성이 떨

* 정회원 · 한양대학교 토목·환경공학과, 교수

** 학생회원 · 한양대학교 토목·환경공학과, 박사수료

*** 한양대학교 토목·환경공학과, 석사과정

· 이 논문에 대한 토론을 2002년 3월 30일까지 본 학회에 보내주시면 2002년 6월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

어지고 있다. 따라서 RC 교각의 설계에 있어서 보다 효율적인 최적설계의 필요성이 요구되고 있다. 이와 관련된 최근의 연구동향을 살펴보면, Salajeheh(1996)⁷⁾의 경우 근사화 방법을 통하여 구조물의 최적화를 수행하였다. 여기서는 근사화 방법으로 설계변수에 대하여 단면력 및 변위에 대한 민감도 분석을 통하여 근사화를 하였다. 그리고 Gang(1999)¹⁾는 반복 수행하는 최적화 과정에서 변위 및 단면내력을 구하기 위한 방법으로 지진하중에 대한 실제 해석을 사용하여 강구조물에 대한 최적설계를 수행하였다. 그러나 이러한 방법들은 최적설계를 수행함에 있어 민감도 분석과 단면력과 변위 등에 대한 재해석을 수행함으로써 많은 해석 시간과 비용이 소요되었다고 판단된다. 또한 국내의 경우 본 연구자에 의해 개발된 재해석 기법을 이용한 최적설계 알고리즘^{9), 10)}의 경우 상부구조에 적용되어 그 타당성 및 효율성이 검증된 바 있다. 그러나 하부구조의 최적설계의 경우 국내 연구는 전무한 상황이다.

따라서 본 논문에서는 교각의 내진설계를 고려한 근사 재해석 방법을 포함하는 최적화 알고리즘 개발을 통해 보다 효율적인 최적설계 방법을 제안하고자 한다.

2. 최적설계 문제의 정식화

본 연구의 대상 구조물인 RC 교각은 현재 다양한 형식이 설계 및 시공되고 있지만 본 논문에서는 제한한 최적설계 방법의 효율성 및 신뢰성 그리고 일반성을 검증하기 위하여 가장 보편적으로 사용되고 있는 형식인 사각 단면 교각을 선정하였다.

RC 교각의 수치적 최적설계를 위하여 설계변수로서 교각의 단면치수와 교각에 사용된 구조적인 거동에 영향을 주는 종방향 철근량을 선정하였고, 목적함수로서는 교각의 제작비용을 최소화하는 것으로 선정하였다. 목적함수의 최적해를 구하는데 있어 제약조건으로는 강도와 철근비, 단면치수, 변위 등을 고려하였다.

2.1 설계변수

설계변수는 본 연구에서 목적함수로 선정한 제작비용에 가장 민감하게 작용하는 단면치수와 철근량을 선정하여 최적설계에 적용하였다.

그림 1은 대상구조물인 RC 교각의 단면과 본 연구에서 선정한 설계변수를 나타내고 있다.

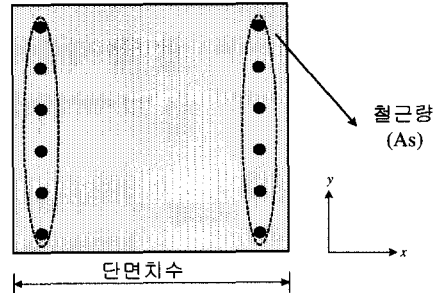


그림 1 콘크리트 교각 단면의 설계변수

2.2 목적함수

본 연구에서는 RC 교각의 제작비용을 목적함수로 정하였다. 제작비용은 시공방법과 제작방법 등에 따라 다양하여 정확한 이론적인 추정은 간단하지 않지만 제작비용이 구조물의 중량에 비례한다는 설계실무의 관행과 제작비에 대한 통계적 자료에 기초를 두고 RC 교각의 목적함수를 다음 식과 같이 제작비용의 함수로 정식화하였다. 여기서 콘크리트의 제작비용은 콘크리트의 제작에 소요되는 재료비 및 인건비, 거푸집 비용 등이 포함되었으며 철근의 경우도 인건비 등이 포함하는 제작비용이다.

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

여기서,

- $F(X)$: RC 교각의 비용함수
- C_C : 콘크리트의 단위부피당 제작비용(만원/m³)
- V_C : 콘크리트의 부피(m³)
- C_R : 철근의 단위중량당 제작비용(만원/ton)
- W_R : 철근의 중량(ton)

2.3 제약조건

RC 교각의 최적설계를 수행함에 있어서 제약조건은 도로교설계기준¹²⁾과 콘크리트구조설계기준¹¹⁾의 강도 설계법을 기준으로 강도와 철근비, 단면치수 그리고 변위에 대한 제약조건들을 표 1과 같이 정식화하였다.

3. 최적설계를 위한 근사화 기법 및 알고리즘

3.1 근사 재해석 기법

실제 교각의 최적설계를 수행함에 있어서 설계점이

표 1 RC 교각의 제약조건

구분	설계제약조건	기호설명
강도	축 강도 $G_1 = \frac{P_u}{\phi P_n} - 1 \leq 0$	P_u : 계수 축하중 강도, P_n : 공칭 축하중 강도 ϕ : 강도감소계수
	휨 강도 $G_2 = \frac{M_u}{\phi M_n} - 1 \leq 0$	M_n : 공칭 모멘트, M_u : 계수 모멘트, ϕ : 강도감소계수
철근비	최대 철근비 $G_3 = \frac{\rho}{\rho_{max}} - 1 \leq 0$	ρ : 사용철근비 ρ_{max} : 최대철근비 : $0.75 \times \beta_1 \times 0.85 \cdot \left(\frac{f_{ck}}{f_y} \right) \cdot \left(\frac{6000}{6000 + f_y} \right)$
	최소 철근비 $G_4 = \frac{\rho_{min}}{\rho} - 1 \leq 0$	ρ : 사용철근비 ρ_{min} : 최소철근비 = $0.80\sqrt{f_{ck}}/f_y$, $14/f_y$ 중 큰 값
	철근량 제한 $G_5 = 1 - \frac{A_s}{0.01 \times A_g} \leq 0$ $G_6 = 2 \times \frac{A_s}{0.08 \times A_g} - 1 \leq 0$	A_g : RC 교각의 전단면적 A_s : 철근의 단면적
단면치수	$G_7 = 1 - \frac{A_g}{0.06} \leq 0$	A_g : RC 교각의 전단면적
변위	$G_8 = \frac{\delta}{\delta_{all}} - 1 \leq 0$	δ : 실제변위 δ_{all} : 허용변위

변화함에 따라서 매번 지진해석을 통한 구조물의 응답이 필요하기 때문에 기존문헌^(1),7)에서는 실제 지진해석을 수행하거나 유한 차분법에 근거한 민감도 해석을 통한 구조물의 동적 응답을 근사적으로 재해석하는 방법을 사용하였다. 따라서 실질적인 최적설계에서 기존의 재해석 기법은 방대한 수치해석 노력과 많은 계산비용이 필요하다. 이렇게 많은 양의 수치해석과 비용이 소요되면 실질적인 최적설계라 할 수 없다. 이러한 단점을 보다 효과적으로 다루기 위하여 본 연구에서는 설계 민감도해석을 수행하지 않고도 신뢰성면에서 가장 확실한 방법인 매번 실제해석을 사용한 최적설계와 동일한 결과를 얻을 수 있는 강도에 대한 효율적인 재해석 기법을 제안하였다.

강도에 대한 일반적인 제약조건은 식(2)에서 보는 바와 같이 소요강도와 설계강도의 함수로 구성되어있다.

$$G(x) = \frac{Q}{R} - 1 \tag{2}$$

여기서,

- Q : 소요강도
- R : 설계강도

식(2)에서 소요강도(Q)는 구조해석 과정을 거쳐야 하는 음함수(Implicit Function)이고 설계강도(R)는

설계변수에 양함수(Explicit Function)로 표현된다. 여기서 설계변수변화에 따른 강도변화에 지배적인 영향을 주는 인자를 살펴보면 소요강도의 변화 $\partial Q/\partial X$ 보다 설계강도의 변화 $\partial R/\partial X$ 가 훨씬 더 지배적이다. 따라서 근사화된 강도 재해석 기법은 아래의 식(3)과 같이 나타낼 수 있다. 이러한 강도 재해석방법은 설계민감도 해석이 필요 없고 설계변수에 양함수인 설계강도의 계산만을 요구한다.

$$G(x) \approx G(x^*) + Q^* \left(\frac{R^* - R}{R^* R} \right) \tag{3}$$

여기서,

- $G(x^*)$: 현재 설계점에서의 강도 제약조건
- Q^* : 현재 설계점에서의 소요강도
- R^* : 현재 설계점에서의 설계강도
- R : 다음 설계점에서의 설계강도

우선 초기치에 대한 구조해석결과인 단면력을 상수로 고정시키고 최적설계에 필요한 설계강도를 설계변수의 변화에 따라 직접 구하는 근사화된 강도 제약조건을 이용하여 근사 최적점을 구한다. 그리고 이 근사 최적점에서 구조해석을 다시 수행하여 강도 수렴 여부를 판단하여 수렴하지 않았다면 두 번째 해석에서 구한 단면력들을 다시 상수로 고정하여 최적설계를 반복하여 최적

설계점을 찾는다.

3.2 제약조건 소거기법

실제 설계에 있어서 구조물의 변위를 계산하기 위해서는 구조물에 대한 해석이 반드시 필요하다. 그러나 최적설계를 수행함에 있어서 변위 계산을 위하여 매번 해석을 수행한다는 것은 상당한 시간과 비용을 요구한다. 따라서, 본 논문에서는 이러한 점을 극복하기 위하여 RC 교각 설계에서 변위에 대한 제약조건이 비지배적이라는 구조적인 특성을 고려하여 강도제약조건과 변위제약조건을 분리하는 제약조건 소거기법을 사용하였다. 즉, 앞서 언급하였듯이 우선 강도에 대한 제약조건만을 고려하여 최적설계를 수행한 후 그 결과에 대하여 변위에 대한 제약조건의 만족여부를 확인하여 만족하지 않는 경우에만 변위에 대한 민감도 해석을 수행하여 변위제약조건을 포함하는 최적설계를 수행하도록 하였다.

3.3 최적설계 알고리즘

RC 교각의 최적설계에 있어 여러 제약조건이 주어지고 또한 지진하중까지 고려되어야 하는 경우 그림 2와 같은 알고리즘을 가지는 기존의 최적설계 방법³⁾으로는 효율적인 최적설계를 기대하기 어렵다. 그림 2에서 보면 최적설계를 수행함에 있어 모든 제약조건을 고려하여 최적설계를 수행함으로써 매 최적값 찾을 때마다

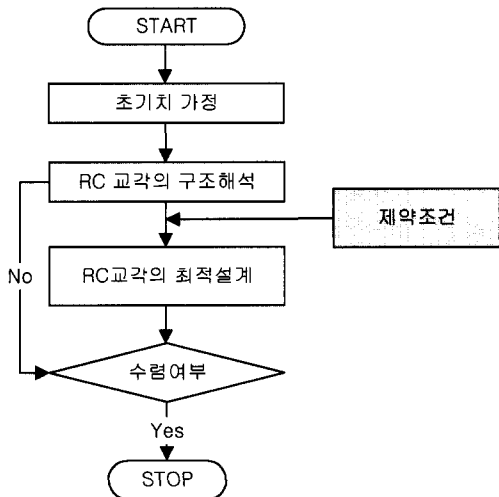


그림 2 기존 RC 교각의 최적설계 알고리즘

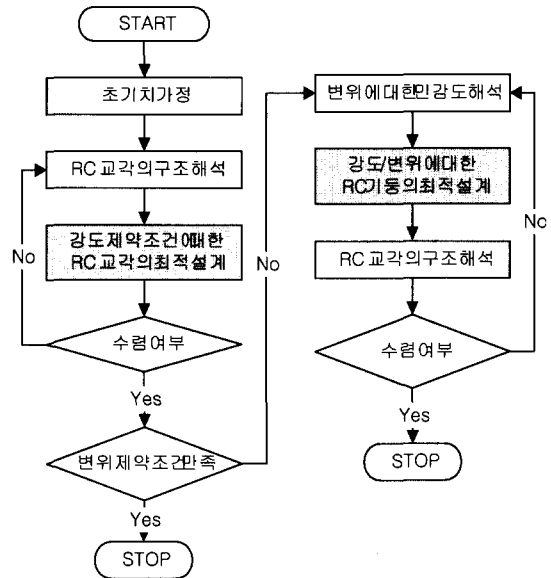


그림 3 제안한 RC 교각의 최적설계 알고리즘

구조해석이 필요하게 되므로 많은 계산량과 시간이 필요하게된다. 따라서 효율적인 최적설계 방법이라 할 수 없다. 본 연구에서는 제안한 재해석 기법과 제약조건 소거기법에 기초한 새로운 최적설계 알고리즘을 그림 3와 같이 제안하였다. 그림 3에서 보면 앞서 언급하였듯이 제약조건 소거기법에 근거하여 변위에대한 제약 조건은 고려치 않고 우선 강도에 대한 최적설계를 수행하여 최적값을 찾은 후에 그 최적값에 대하여 변위 제약 조건을 만족하지 않을 시에만 변위에 대한 민감도 해석을 수행하여 최적설계를 하도록 하여 해석 시간과 비용을 줄일 수 있도록 하였다.

또한 최적화 방법은 기존의 최적화 방법과 같은 최적해의 신뢰성면에서 우수한 ALM(Augmented Lagrange Multiplier)방법과 BFGS(Broydon Fletcher Goldforb Shanno)방법을 사용하였다. 또한 단일변수함수의 최적해탐사는 황금분할법(Golden Section Method)을 이용하였다. 이와 같은 알고리즘은 국부최적화기법들을 부프로그램으로 형성하고 있는 ADS(Automated Design Synthesis)⁴⁾를 이용하여 수행하였다.

4. 적용예

본 논문에서 제안한 RC 교각의 최적설계 알고리즘의 타당성을 검증하기 위하여 RC 교각을 하부구조로

하는 대상구조물을 선정하였다. 우선 최적설계를 수행함에 있어 설계점이 변화 할 때마다 매번 구조해석을 수행하여 구조응답을 얻은 후 최적설계를 수행하는 기존의 최적설계방법과 비교를 위하여 간단한 대상구조물을 선정하여 단일모드 스펙트럼을 적용하여 최적설계를 수행하였고, 실질적인 최적설계를 위해 다양한 경간과 교각 높이에 대해서 복합모드 스펙트럼을 적용한 예제를 통하여 최적설계를 수행하였다.

4.1 단일모드 스펙트럼을 적용한 수치예제

제안한 최적설계 방법의 효율성과 신뢰성을 검토하기 위해 기존의 최적설계 방법에 의해 수행된 최적설계와 본 연구에서 제안한 최적설계 방법을 이용한 최적설계를 동일한 수치예제에 적용하였다. 내진설계에 대해서는 기존의 최적설계 방법과 제안한 최적설계 방법의 효율성 비교를 위하여 도로교설계기준¹²⁾의 교축방향에 대한 지진하중만 고려하여 최적설계를 수행하였다.

4.1.1 일반사항

수치예제에 사용된 대상구조물은 그림 4와 같이 3경간 연속으로 상부구조는 강상자형교이고, 하부구조는 정사각형 단면을 가지는 교각으로 구성되어 있다. 교각의 높이는 표 2에 나타난 것처럼 다양한 높이의 교각에 대한 수치해석을 수행하였다. 적용예에 사용된 최적설계의 초기치는 단면치수는 250cm, 철근량은 300cm²로 적용하였다.

단위공비는 시공방법 및 제작여건에 따라 큰 차이를 나타낸다. 따라서 본 연구에서는 설계실무에서 보편적으로 사용하는 제작공비 산출방법인 도로공사 실시설계기준¹⁴⁾을 참고하여 표 3과 같이 적용하였다.

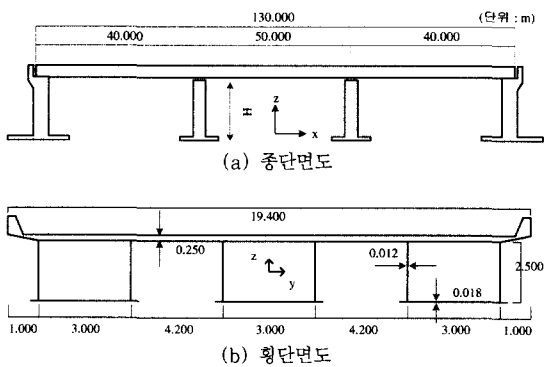


그림 4 대상구조물

표 2 대상구조물 재원

구 분	대 상 교 량
교 량 형 식	3경간 연속 강상자형교
교 장(m)	40+50+40=130
교 폭(m)	19.4
교각 높이(m)	5, 10, 20, 30

표 3 단위공비

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

내진 설계의 해석 방법으로는 국내 시방규준에 따라 단일모드 스펙트럼을 적용하는데 본 논문에서 제안한 최적설계 방법의 타당성을 검증하기 위하여 교축방향에 대해서만 그림 5와 같이 등가정적 지진하중을 작용시켰으며, 내진 설계에 대한 일반사항은 표 4와 같다.

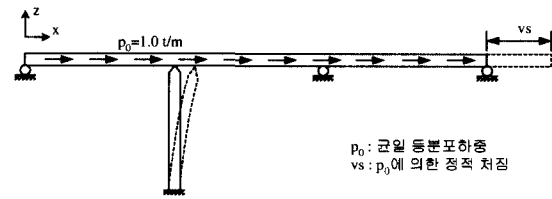


그림 5 종방향 거동 모델링

표 4 내진 설계 일반사항

구 분	대 상 교 량	
내진 설계 일반 사항	지진구역	I
	구역계수	0.11
	위험도 계수	1.4(재현주기 1000년)
	지반종류	Soil Type II
	지반계수(S)	1.2

4.1.2 결과 및 분석

기존의 최적설계 방법과 본 연구에서 제안한 최적설계 방법을 이용한 최적설계를 수행한 결과를 표 5에 나타내었다. 표 5에 나타낸 바와 같이 목적함수에 있어 제안한 최적설계 방법과 기존의 최적설계 방법에 의한 값의 오차는 최대 0.0023%로 거의 차이가 없음을 알 수 있다. 이는 제안한 최적설계 방법의 결과가 강도제약조건을 만족하면서 비용을 최소로 하는 합리적인 설

표 5 3경간 연속보의 최적설계 결과

교각높이 (m)	단면치수(cm)		철근량(cm ²)		목적함수(제작비용 : 만원)		해석횟수(회)	
	기존 최적설계	제안한 최적설계	기존 최적설계	제안한 최적설계	기존 최적설계	제안한 최적설계	기존 최적설계	제안한 최적설계
5	115.32	115.32	142.42	142.43	380.87	380.87	658	4
10	107.19	107.19	298.33	298.34	863.97	863.98	1579	7
20	107.17	107.18	298.41	298.49	1728.07	1728.11	2350	8
30	107.19	107.19	298.37	298.36	2592.12	2592.12	2287	8

계를 수행하는데 있어 해의 신뢰성을 확보했다고 판단되며 교각의 높이를 5m에서 30m까지 변화 시켜도 기존 최적설계방법과 제안한 최적설계 방법의 결과가 동일하게 나타나므로 제안한 최적설계 방법의 일반성이 보장된다고 할 수 있다. 또한, 해석횟수를 살펴보면 기존의 최적설계 방법에 있어서는 658회에서 2287회의 해석을 수행하였다. 그러나 본 연구에서 제안한 최적설계 방법은 4회에서 8회로 교축방향에 대한 조건만을 재해했음에도 불구하고 기존의 최적설계 방법 보다 효율성이 매우 우수하다고 판단된다.

이는 강도제약조건을 산정하는 해석부분에서 설계된 강도를 사용하지 않고 구조적 특성을 효과적이면서 근사적인 방법으로 재해석을 수행함으로써 매번 구조해석을 실시하지 않고 기 설계점에서 해석한 결과를 설계 강도의 계산만으로 다음 설계점의 제약조건을 계산한 결과로 보인다. 그리고 그림 6에 보는 바와 같이 제안한 최적설계 방법에 의한 최적설계에서 초기치를 80%~150%까지 변화시킴에도 불구하고 안정적으로 최적해에 수렴함을 알 수 있다. 따라서 해의 신뢰성에 있어 중요한 수렴성이 확보되었다고 판단된다.

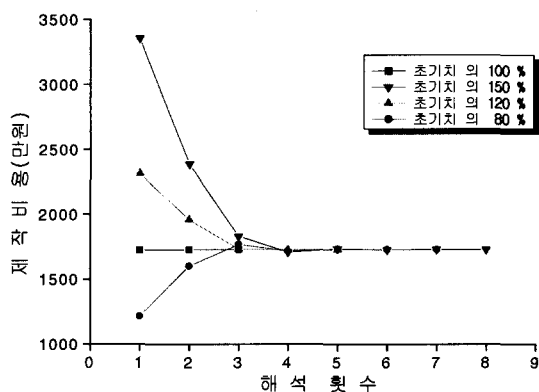


그림 6 목적함수의 수렴성

4.2 복합모드 스펙트럼을 적용한 수치예제

실질적인 교각의 최적설계시 제안한 재해석 기법과 제약조건 소거기법을 사용한 최적설계 알고리즘의 효율성을 입증하기 위하여 복합모드 스펙트럼을 적용하여 최적설계를 수행하였다.

4.2.1 일반사항

적용예에서 사용된 대상구조물은 그림 7과 같이 상부구조의 경우 앞선 예제와 같은 형식이교다경간 연속교를 대상구조물로 선정하였으며, 횡단면도 및 교각 단면은 그림 7과 같다. 교각의 높이 및 경간은 표 6에 나타난 것처럼 다양한 예제를 적용하였다.

앞서 언급하였듯이 내진 설계에 있어서는 국내 지방서규준^{11),12)}에 따라 복합모드 스펙트럼을 이용하였으며, 이를 해석하기 위하여 범용 유한요소 구조해석 프로그

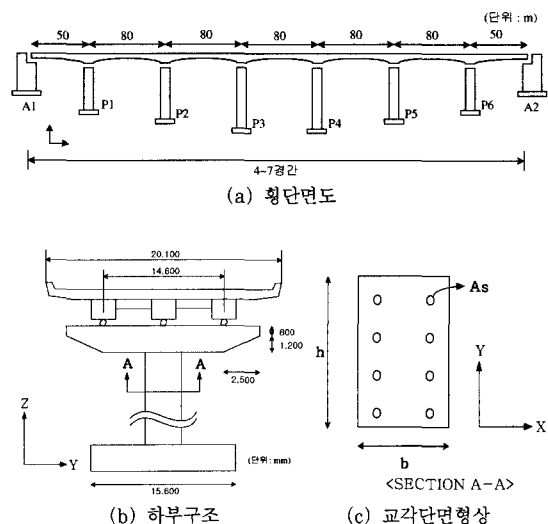


그림 7 대상구조물 단면

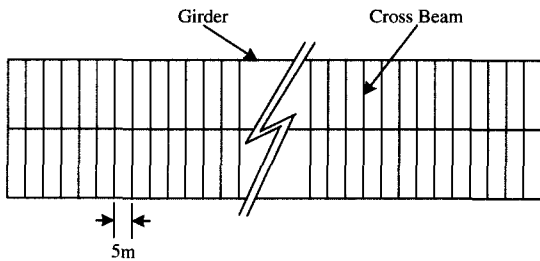
표 6 대상구조물 자원

경간	교각높이	교장
4	4.5/5.7/4.5	50+2@80+50=260m
5	4.5/2@5.7/4.5	50+3@80+50=340m
6	3.2/4.5/5.7/4.5/3.2	50+4@80+50=420m
7	3.2/4.5/2@5.7/4.5/3.2	50+5@80+50=500m
교폭	19.4m	
내진설계	복합모드 스펙트럼, 내진 1등급 교	

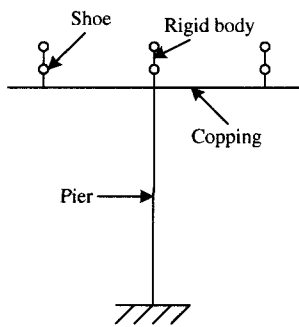
램인 SAP2000을 사용하였다.

FORTTRAN을 통하여 SAP2000 입력 자료를 구성하고 이를 통해 대상구조물에 대한 구조해석을 실시하였다. 그리고 구조해석을 통해서 얻어진 응답을 역시 FORTRAN으로 구성되어 있는 ADS를 통해 최적설계를 수행하였다. 만약 ADS를 통해서 얻어진 값이 최적 값이 아닌 경우 이 값을 초기 값으로 전환하여 다시 SAP2000 입력 자료를 만들어 구조해석을 실시하였다. 이와 같은 과정의 반복을 통해 최적해를 얻었다.

단위공비는 앞서 언급한 표 3과 같으며, 처짐에 대한 기준은 도로교설계기준¹²⁾의 허용변위 기준인 최소받침 지지길이를 적용하였다. 그리고 대상구조물의 모델링은



(a) 상부구조 모델링



(b) 하부구조 모델링

그림 8 대상구조물의 모델링

그림 8과 같이 상부구조는 보요소를 이용하여 주형과 가로보를 격자로 모델링 하였고, 하부구조는 뼈대요소로 모델링 하였다.

4.2.2 결과 및 분석

복합모드 스펙트럼을 적용하여 기존의 최적설계방법과 제안한 최적설계 방법에 의해 최적설계를 수행한 결과를 표 7에 나타내었다. 표 7에서 살펴보면 단일모드 스펙트럼에 적용했던 것과 같이 기존의 최적설계 방법과 제안한 최적설계 방법의 목적함수의 오차는 최소 0.050%에서 최대 0.124% 정도로 수치해석상의 수정 범위를 고려한다면 같은 결과라고 볼 수 있다. 이는 본 논문에서 제안한 최적설계 방법이 복합모드 스펙트럼에 적용하여도 최적설계를 수행하는데 있어 해의 신뢰성을 확보했다고 판단된다. 그리고 경간수를 4개에서 7개로 변화 시켰음에도 기존 최적설계 방법과 제안한 최적설계 방법의 결과가 동일함으로 복합모드 스펙트럼에서도 역시 일반성이 보장된다고 할 수 있다. 또한 해석수를 보면 기존의 최적설계 방법의 경우 1127회에서 2511회의 해석을 수행하였으나 본 논문에서 제안한 최적설계 방법은 6회에서 12회로 기존의 최적설계 방법에 비해 효율성이 매우 우수하다고 판단된다.

그리고 변위에 있어서는 허용변위는 672.162mm에서 1072.962mm이나 실제 구조해석을 통해 얻어진 변위는 36.669mm에서 58.488mm이다. 그림 9는 경간 수에 따른 허용변위와 실제 변위를 도식화하여 나타낸 그림이다.

그림 9에서 보면 실제변위와 허용변위의 차이가 크을 알 수 있다. 이로써 앞서 제안한 변위가 비지배적이라

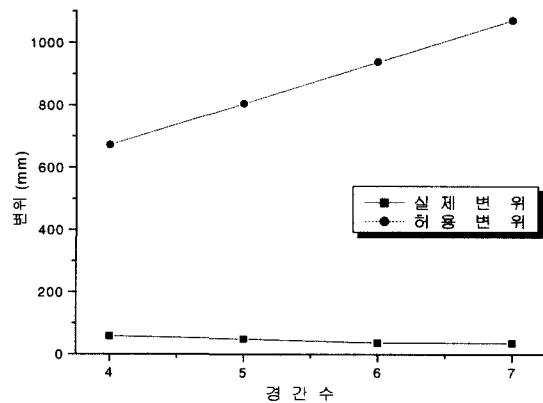


그림 9 경간수에 따른 실제변위와 허용변위

표 7 대상구조물의 최적설계 결과

경간수	교 각 높 이		설 계 변 수			실제(허용 [†])변위 (mm)	제작비용 (만원)	재해석수 (회)
			b(m)	h(m)	As(cm ²)			
4	4.5/5.7/4.5	기존	1.740	2.328	340.79	58.488 (672.162)	1497.1	2341
		제안	1.742	2.328	340.80		1498.5	9
5	4.5/2@5.7/4.5	기존	1.917	2.553	410.99	49.322 (805.762)	1807.7	2511
		제안	1.915	2.554	410.95		1806.8	12
6	3.2/4.5/5.7/4.5/3.2	기존	2.361	3.148	625.21	37.702 (939.362)	2746.7	1127
		제안	2.362	3.150	625.11		2748.7	6
7	3.2/4.5/2@5.7/4.5/3.2	기존	2.390	3.186	638.60	36.669 (1072.962)	2811.4	2412
		제안	2.388	3.184	638.59		2807.9	9

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

는 RC 교각의 구조적 특성이 입증되었고, 본 논문에서 제안한 최적설계 방법에서 사용된 제약조건 소거기법과 강도에 대한 근사 재해석 기법이 타당함을 알 수 있다.

5. 결 론

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

- 1) 내진해석이 필요한 RC 교각의 최적설계시 기존의 최적설계방법으로는 매우 많은 수의 구조해석과 비용이 필요하므로 실제구조물에 적용하기가 거의 불가능하였다. 그러나 본 연구에서 제안한 최적설계 방법을 이용하여 RC 교각의 최적설계를 수행할 경우 기존의 최적설계 방법에 비해 효율적이고 신뢰성을 갖는 효과적인 최적설계를 수행할 수 있다.
- 2) RC 교각의 최적설계에 있어 강도제약조건만을 고려하여 최적설계를 수행하고, 변위제약조건을 만족 여부를 확인한 후 변위제약조건에 위배되는 경우에 대해서만 변위제약조건을 포함하는 제약조건 소거 기법은 RC 교각의 최적설계를 수행하는데 있어 매우 효과적인 방법이다.
- 3) 본 논문에서는 RC 교각의 최적설계를 수행하는데

있어서 목적함수인 제작비용에 가장 민감한 요인들만을 고려하여 최적설계를 수행하였으나 향후 보다 실질적인 최적설계를 수행하는데 있어서는 보다 많은 사항이 고려되어야한다고 판단된다. 그러나 본 논문에서 제안한 최적 설계방법은 실용적인 RC 교각의 최적설계를 위한 프로그램의 개발에 있어 중요한 알고리즘으로 사용될 수 있다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 BK21 사업 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. Gang Li, Ren-Gen Zhou, Lian Duan, Wai-Fah Chen, "Multiobjective and multi-level optimization for steel frames," Engineering Structures, Vol. 21, Issue 6, June 1999, pp.519~529
2. Garret N. Vanderplaats, "ADS: A FORTRAN Program for Automated Design Synthesis, Engineering Design Optimization," Inc., Santa Barbara, California, 1985
3. Garret N. Vanderplaats, "Numerical Optimization Techniques for Engineering Design with Applications," McGraw-Hill, Inc., 1984
4. Kwak H. G., Choi C. K. and Chung G. T., "Direct search approach to optimum spiral

- column design," *Engineering Structures*, Vol. 18, Issue 5, 1996
5. Lust, R. V. and L.A.Schmit, "Alternative Approximation Concepts for Space Frame Synthesis," *AIAA/ASME/ASCE/AHS 26th Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, April, 1985, pp.333~348
 6. Manickarajah D., Y. Xie M., Steven G. P., "Optimisation of column and frames against buckling," *Computer & Structures*, Vol. 75, Issue 1, 1999, pp.45~54.
 7. Salajeheh E., "Structural optimization using response approximation and optimality criteria methods," *Engineering Structure*, Vol. 19, No. 7, 1997, pp.527~532
 8. Salajeheh E. and Vanderplaats. G. N., "An efficient approximation method for structural synthesis with reference to space structure," *Int. J. Space Struct.*, Vol. 26, 1987, pp.165~175
 9. 조효남, 정지승, "효율적인 재해석 기법에 의한 강상형교의 최적설계", *한국강구조학회 논문집* 제11권, 제5호, 1999
 10. 조효남, 정지승, 민대홍, "강상자형교 자동화 최적설계 프로그램", *한국강구조학회 논문집* 제12권, 제5호, 2000
 11. 건설교통부, 콘크리트구조설계기준, 1999
 12. 한국도로교통협회, 도로교설계기준, 2000
 13. 한국도로공사, 도로설계요령, 1992
 14. 한국도로공사, 실시설계기준, 1997