

내진설계시 경제성 및 시공성을 고려한 RC 교각의 최적설계

Optimum Seismic Design of Reinforced Concrete Piers Considering Economy and Constructivity

조병완*
Jo, Byung Wan

김영진**
Kim, Young Jin

윤은이***
Yoon, Eun Yee

ABSTRACT

In this study, optimal design of reinforced concrete piers under seismic load is numerically investigated. Object function is the area of the concrete-section. Design variables are the total area of reinforcement and concrete-section dimension(Circular section diameter). Constraints of the design strength of the column, longitudinal reinforcement ratio and lower and upper bounds on the design variables are imposed. The reinforcement concrete column is analysed and designed by the Ultimated Strength Design method and load combination involving dead, live, wind and seismic load is used. For numerical optimization, ADS(Garret N, Vanderplaats) routine is used.

From the result of numerical examples, the concrete-section dimension was reduced, but longitudinal reinforcement was not changed. The results show that confinement reinforcement was reduced and confinement reinforcement spacing is increased. The higher strength of reinforcement used, the more concrete-section area was reduced.

1. 서론

여러 가지 자연재해 중 지진현상은 인간에게 심각한 피해를 주는 재해 중 하나이다. 이러한 지진에 의해 막대한 재산과 인명피해를 입음에 따라 지진 발생 빈도가 많은 여러 나라에서는 지진에 대한 많은 대비책을 마련함으로써 피해를 최소화하고 있다. 과거 지진발생 확률이 아주 미미하였던 우리나라도 최근 구조물에 피해를 입힐 수 있는 지진이 다소 발생함에 따라 더 이상 지진에 대한 안전지대가 아님을 알 수 있다. 이러한 지진에 대비하여 우리나라에서도 1992년 개정된 도로교표준시방서에 내진설계편이 신설됨에 따라 토목구조물에서도 내진설계가 도입되게 되었다. 그러나, 구조물 건설시 내진설계를 도입함으로써, 지진하중에 대한 구조물의 안정성은 높아지고 있으나, 지진하중에 대하여 과도한 설계를 함으로써, 비경제적인 설계가 되고 있다 특히 교량에 대한 내진설계시 교각은 종방향 철근

*정회원, 한양대학교 토목공학과 교수

**정회원, 한양대학교 토목공학과 박사과정

***정회원, 한양대학교 토목공학과 석사과정

및 횡방향 철근이 과도하게 배근되고 있으며, 이러한 설계는 현장 시공시 현장실무자들에게도 많은 어려움을 주고 있는 실정이다. 따라서 본 논문에서는 내진설계시 최적화기법을 적용함으로써, 보다 경제적이고 안정적인 구조물로 건설하는데 기초적인 자료로 제시하고자 한다.

2 최적화

최적화 수행을 위하여 제약최적화문제를 ALM(Augmented Lagrange Multiplier method)을 통하여 비제약최적화문제로 전환하였으며 비제약최적화문제를 Fletcher-Reeves algorithm 과 Golden Section method를 사용하여 최적화를 수행하였다.

2.1 목적함수

지진하중에 대한 교각의 단면설계시 중요변수로 고려되는 기둥의 단면과 사용된 종방향철근량을 줄임으로서 경제성을 향상시키기 위해, 최적화기법 도입시 목적함수는 교각의 기둥 단면을 최소화하는 것으로 한다.

2.2 설계 변수

최적화 하고자 하는 값, 목적함수인 설계단면을 최소화하기 위하여 목적 함수에 크게 영향을 미치는 변수를 설계변수로 취한다. 본 논문에서는 단면의 직경, 종방향 철근의 총면적을 설계변수로 하였다.

2.3 제약방정식

2.3.1 설계변수에 대한 제약조건 방정식

도로교 표준시방서와 콘크리트 표준시방서의 규정에 따라 설계변수의 최소, 최대 치수 및 최대 최소 철근비와 시공성을 고려한 철근의 순간격을 제약조건식으로 구성하였다.

2.3.2 구조거동에 대한 제약조건 방정식

극한하중이 극한강도설계법으로 구한 기둥의 설계강도를 초과하지 않도록 제약조건식을 구성하였다.

$$g(1) \sim g(6) = \frac{P_u}{\phi P_n} - 1 \cdot \text{LOAD CASE 1} \sim 6 \quad g(7) \sim g(12) = \frac{M_u}{\phi M_n} - 1 \cdot \text{LOAD CASE 1} \sim 6$$

$$g(13) = \frac{X(2)}{\pi \times X(1)^2 / 4} - 0.03 \cdot \rho_l < 3\% \quad g(14) = 0.01 - \frac{X(2)}{\pi \times X(1)^2 / 4} \cdot \rho_l > 1\%$$

2.4 수치예

수치예로서 사용된 대상구조물의 상부구조는 Steel Box Girder, 하부구조는 T형, 기초형식은 직접기초 및 현장 타설 말뚝이 사용되었으며, 물성값은 아래와 같으며, 대상구조물에 대한 형상도는 그림 1에 나타내었다.

- 내진 등급 : 내진 1등급
- 내진 해석방법 : 다중모드스펙트럼
- 교각 높이 : 30.00m
- 교각 단면 : 350cm
- 콘크리트 압축강도 : $f_{ck} = 240 \text{ kgf/cm}^2$
- 철근의 항복강도 : $f_{ck} = 3000 \text{ kgf/cm}^2$
- 종방향 철근 : 291D-29 ($\rho_g = 1.943\%$)
- 띠철근 : D22 원형띠철근

위의 물성값을 이용하여 시방서 규정에 따라 지진하중, 풍하중 등의 하중에 대하여 계산한 후 다시 이 값들을 유한요소 프로그램을 이용하여 하중을 산정하여 표 1의 값과 같이 하중조합을 하였다.

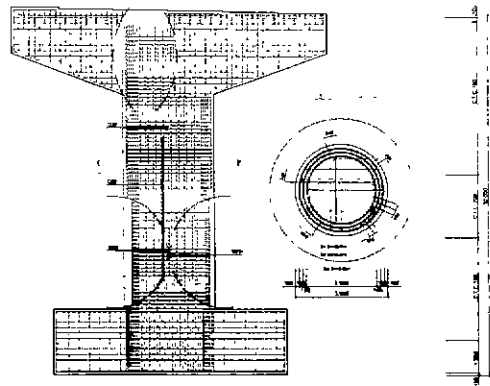


그림 1. 수치에 1의 형상도 (D=3.50m)

표 1. 수치에의 설계하중

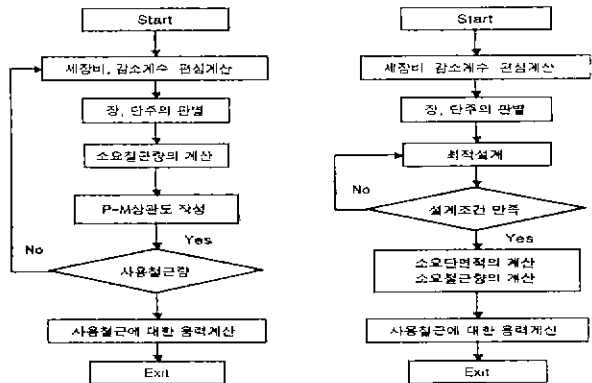
Load Case	실 계 하 중			비 고
	$F_v(\text{ton})$	$M_x(\text{t/m})$	$M_y(\text{t/m})$	
LC 1	2001.6	2893.0	-	사하중+풍하중
LC 2	2381.7	1446.5	-	사하중+활하중+풍하중
LC 3	2290.1	1390.9	-	사하중+활하중+풍하중 +온도하중
LC 4	2001.6	621.4	4548.7	사하중+지진하중(경우1)
LC 5	2001.6	2072.2	136.7	사하중+지진하중(경우2)
LC 6	2007.8	355.5	-	사하중+활하중

표 2. 수치에의 제약조건 해석결과

제약 조건	g(1)	g(2)	g(3)	g(4)	g(5)	g(6)	g(7)
함수값	-4.8988 E-01	-6.9288 E-01	-7.0588 E-01	1.6124E -06	-5.7797 E-01	-8.8088 E-01	-4.8988 E-06
비고	-	-	-	active	-	-	-
제약 조건	g(8)	g(9)	g(10)	g(11)	g(12)	g(13)	g(14)
함수값	-6.9288 E-01	-7.0588 E-02	1.6124E -08	-5.7797 E-01	-8.8088 E-01	-2.7828 E-01	-5.4188 E-01
비고	-	-	active	-	-	-	-

3. R.C교각 설계 흐름도

기존의 경험적인 설계에 최적화기법을 도입하여 개선시킨 R.C교각 설계 흐름도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.



일반적인 기둥설계

최적 기둥설계

그림 2. 기둥에 대한 최적설계 흐름도

4. 고찰

4.1 설계변수에 대한 고찰

최적화 기법을 이용하여 설계한 결과 수치에 교각 기둥의 콘크리트 단면은 직경이 감소하였으나 철근의 면적은 아주 미소 증가하였다. 종방향 철근의 증가 정도가 0.02%로서 아주 미소하게 증가되어 종방향 철근량의 변화량은 거의 없는 것으로 나타났다. 단면이 감소함에 따라 종방향 철근비가 증가하는 것으로 최적값이 수렴하는 것을 알 수 있었다.

표 3. 수치에 1)의 초기설계값과 최적설계값의 비교

	X(1)	X(2)	총면적	종방향철근비
초기설계	350.00	1869.38	96211.26	1.943
최적설계	330.44	1869.73	85769.32	2.180

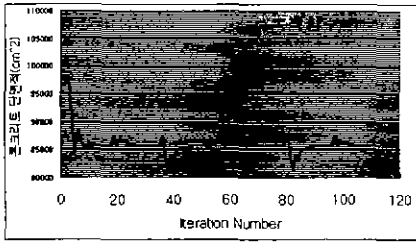


그림 3. 최적화 단계별 목적함수값의 변화그림

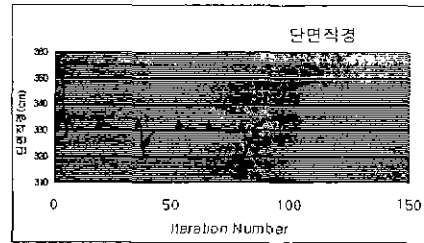


그림 4. 최적화 단계별 설계변수값의 변화 (단면의 직경)

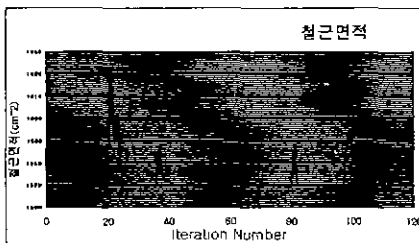


그림 5. 최적화 단계별 설계변수값의 변화 (종방향 철근의 총 면적)

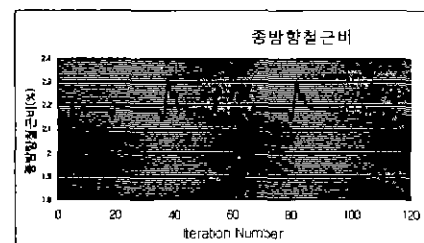


그림 6. 최적화 단계별 종방향 철근비의 변화

4.2 종방향 철근비에 관한 고찰

종방향 철근비에 관한 우리나라 도로교 표준시방서에는 1%~8%, ACI 318-95에도 1%~8%로 규정하고 있으며, 뉴질랜드나 일본에서는 하한치로 0.8%, 0.5%까지 허용하고 있다. 철근비에 상한치로 시공성등을 고려하여 보통에 있어서는 3%내에서 설계가 이루어지고 있다. 본 연구에서는 종방향 철근비를 1%~3%사이에서 오도록 제약조건을 구성하였다. 최적화 결과 3%이내에서 수렴하는 것을 알 수 있었다.

4.3 축력비 효과에 대한 고찰

교각의 내진거동에 있어서 축력비는 중요한 변수중에 하나이다. 그림 7에 Priestley, Park(1987)의 축력비에 대한 실험결과를 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 일반적으로 축력비가 낮을 경우에 축력비가 높을 때보다 연성거동이 훨씬 향상되는 것으로 알려져 있으며, 충분한 연성거동을 유도하기 위하여 축력비를 0.7이하로 두어야한다.

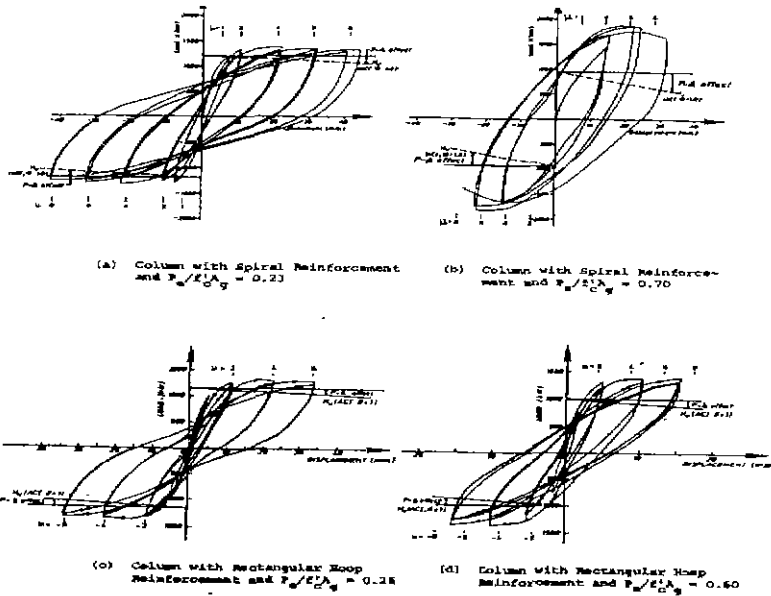


그림 7. 나선철근 및 띠철근의 축력비에 따른 이력거동

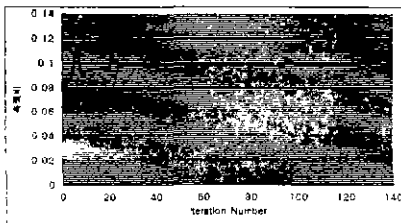


그림 8. 최적화 단계별 축력비의 변화(수치예)

그림 8에 축력비의 변화를 그래프로 나타내었다. 단면이 감소하였으나 낮은 축력비에서 수렴하였고, 내진에 대한 연성거동을 확보할 수 있는 것을 알 수 있었다.

4.4 콘크리트 강도 및 종방향철근의 항복강도에 대한 고찰

본 연구에서는 현재 일반적인 설계시 연성에 대한 안전성 확보가 가능하나, 내진설계시 연성확보의 문제로서 일반적인 설계에서는 많이 사용하지 않고 있지만 시공성 향상을 위해 콘크리트의 설계기준 강도와 철근의 항복강도를 증가시켰을 때 목적함수가 감소되는 변화를 알아보기 위하여 다음 3가지 경우에 대하여 최적화를 수행하였다.

표 4 콘크리트강도 및 철근의 항복 강도에 따른 목적함수변화(case1)

	X(1)	X(2)	총면적	종방향 철근비
초기 설계	350.00	1869.38	96211.26	1.943
최적 설계	326.61	1869.68	83005.71	2.229

콘크리트의 설계기준강도 - 270kgf/cm²
 철근의 항복강도 - 3000kgf/cm²

표 5 콘크리트강도 및 철근의 항복 강도에 따른 목적함수변화(case2)

	X(1)	X(2)	총면적	종방향 철근비
초기 설계	350.00	1869.38	96211.26	1.943
최적 설계	306.74	1869.50	73696.21	2.530

콘크리트의 설계기준강도 - 240kgf/cm²
 철근의 항복강도 - 4000kgf/cm²

표 6 콘크리트강도 및 철근의 항복 강도에 따른 목적함수변화(case 3)

	X(1)	X(2)	총면적	종방향 철근비
초기 설계	350.00	1869.38	96211.26	1.943
최적 설계	303.21	1869.44	72204.22	2.509

콘크리트의 설계기준강도 - 270kgf/cm²
 철근의 항복강도 - 4000kgf/cm²

표 4, 5, 6의 결과로 보면 같은 철근의 상황에서 콘크리트의 강도를 증가시켰을 때는 거의 단면에 대한 변화가 미소하였으나, 동일한 콘크리트 기준강도에서 철근의 항복강도를 증가 시켰을 때 목적함수가 약 14%정도 감소됨을 알 수 있었다. 기둥의 단면 설계시 단면을 줄이고 철근의 배근에 따른 시공성을 높이기 위해서는 콘크리트의 설계강도를 증가시키는 것보다 철근의 항복강도를 증가시키는 것이 효율적임을 알 수 있었다.

5. 결 론

철근콘크리트 교각의 내진설계시 최적화 알고리즘을 이용하여 설계변수로 교각의 단면과 종방향 철근량을, 목적함수로는 교각의 단면적을 최소화하는 것으로 선정하여 최적설계한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 본 연구에서의 대상구조물에 대한 수치해석 결과 6%정도 콘크리트의 단면을 줄인 설계값을 얻을 수 있었다.
- (2) 기존의 일반적인 교각 설계시에 콘크리트 단면을 과다하게 산정함으로서 횡방향 철근량이 증가되어 시공시 많은 문제점이 발생하였지만, 최적설계기법을 도입하여 설계함으로서 콘크리트 단면을 감소시켜 횡방향 철근량을 감소시킬 수 있었다.
- (3) 내진설계의 연성거동을 만족하는 한도 내에서 콘크리트 기준강도와 종방향 철근의 항복강도를 변화시켜 최적화를 수행한 결과 종방향 철근의 항복강도를 증가시켰을 경우 목적함수를 약 14%정도 감소시킬 수 있었으나, 콘크리트강도를 높였을 경우엔 목적함수값의 변화가 거의 없는 것으로 나타났다. 따라서, 콘크리트 설계기준강도를 높이는 것보다 고강도의 철근을 사용하는 것이 효율적임을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 건설교통부, 도로교 표준 시방서, 1996.
2. 건설교통부, 콘크리트 표준 시방서, 1996.
3. 신현득, 문제길, 변동균, "철근콘크리트" 동명사, 1994.
4. 한국도로공사 도로연구소, "고강도 콘크리트를 이용한 철근콘크리트 기둥과 합성기둥의 거동 및 해석", 1998
5. Garret N. Vanderplatts, "Numerical Optimization Techniques for Engineering Design with Applications" McGraw-Hill, 1984.
6. Garret N. Vanderplatts, "ADS : A FORTRAN Program for Automated Design Synthesis" Engineering Design Optimization Inc., Santa Barbara, California, 1985.
7. James G. MacGregor, "Reinforced Concrete" Prentice Hall International, INC, 1997.
8. Anil K. Chopra. "Dynamics of Structures" Prentice Hall International INC., 1995.
9. Singuresu S. Rao, "Engineering Optimaization third edition" John Wiley & Sons Inc., 1996.
10. M. J. N. Priestley, F. Seible, G.M. Calvi, "Seismic Design and Retrofit of Bridges" John Wiley & Sons Inc., 1996.