

교각의 설계 최적화 검토

Review of the Optimal Design for Piers

박상일*
Sang-Il Park정국영**
Guk-Young Jung이태현***
Tae-Hyun Lee박기용****
Gi-Yong Park

1. 머리말

우리나라는 급격한 근대화 및 산업화, 그리고 생활수준의 향상으로 인해 고속도로를 비롯하여 다양한 분야의 사회간접시설에 대한 수요가 급격하게 증가해 왔다. 이러한 사회적, 시대적 요구를 충족시키기 위해 과거에는 구조물을 설계할 때 경제적 설계보다는 시공성을 우선으로 하는 설계가 일반적이었다. 또한 국내의 시공능력을 낮게 평가하고 품질관리의 편의만을 주로 고려하여 설계가 이루어졌으며, 대부분의 철근 콘크리트 구조물은 재료의 불균일성을 이유로 다소 과다한 설계가 이루어졌다. 이러한 상황에서 구조물의 단면은 필요 이상으로 크게 설계되어 경관미가 떨어지고 콘크리트와 철근이 과다하게 사용되는 결과를 유발해온 실정이다.

하지만 현재 우리나라는 OECD 회원국이자 세계 9위의 온실가스(에너지부문 CO₂ 배출량 기준(2007년 기준, IEA)) 배출국가로 국제사회는 중국, 인도 등과 차별화된 감축 방안을 요구하고 있는 실정이다. 이에 정부는 녹색성장 5개년 계획을 수립하여 온실가스 감축을 핵심지표로 각 부문별, 업종별 세부 감축목표 수준을 수립하는 등 친환경 녹색성장을 위해 지속적인 정책을 추진 중에 있다. 또한 국가 경제 규모 역시 세계 15위로 선진국의 대열에 들어서고 있으며, 과거에 비해 발주자, 설계자, 시공자 간의 신뢰가 돈독해진 사회로 성숙화되었다. 이러한 상황에서 토목 구조물 역시 단순한 기능성 위주의 설계보다는 저탄소 녹색성장 중심의 시대적 요구에 맞는 설계를 추진할 필요가 있을 것으로 판단된다. 따라서 한국도로공사에서는 과거의 설계관행을 개선하고 최적설계를 도출하기 위해 다양한 검토를 수행하여 왔다. 특히, 하부구조 단면을 적정한 수준으로 설계하

기 위해 원형 교각 단면 적정성 검토에서부터 압축 부재 최소 축방향 철근량 적용방안 등 하부구조 최적 설계를 위한 다양한 방안들이 검토된 바 있다. 본 검토에서는 콘크리트 교각 단면의 축소를 통해 경제성 제고 및 미관을 개선하고, 재료 사용량의 감소를 유도하여 CO₂ 저감 효과를 개선시키는 것으로 검토 방향을 설정하였다. 또한 교각 설계방법의 적정성 검토 및 철근의 강도, 철근비 적용에 대해 국내 기준과 해외 기준을 비교하여 합리적 설계 방법을 검토하였으며, 교각 형식의 변화에 따른 효과를 비교, 검토하였다. 이러한 설계방안 개선을 통해 교각의 설계, 시공, 유지관리기술 발전 및 경쟁력 확보가 가능할 것으로 기대되며, 경관성이 향상된 친환경 구조물 건설로 고객만족 경영에 기여할 것으로 예상된다. 또한 불필요한 탄소 발생을 적극적으로 감소시킴으로써 환경 피해의 최소화를 통해 녹색성장이라는 시대적 요구를 만족시킬 수 있을 것으로 예상된다.

2. 교각 기둥 설계 현황 및 개선방안

2.1 기둥 설계방법 및 안전율

콘크리트 교각의 기둥은 축력과 휨모멘트가 작용하는 부재로 강도설계법 혹은 허용응력설계법을 이용하여 설계한다. 일반적으로 교각 기둥의 설계는 상시상태의 설계와 내진설계에 좌우된다. 조사된 바에 의하면 많은 경우 $\phi M_n / M_u \geq 1.1$ 로 과다 설계되어지는 경향이 있으며, 탄성설계 내에서 단면을 결정하는 경향을 보인다. 현재 실시설계가 완료된 부산외곽순환고속도로를 대상으로 기둥 설계 현황을 검토한 결과 대상교각 107개소 가운데 탄성설계로 설계한 기둥은 소성설계에 비해 6배 이상 많은 것으로 나타났으며, $\phi M_n / M_u$ 비율이 1.1을 초과해 설계된 경우도 1.0 ~ 1.1 수준으로 설계된 경우보다 2배 이상 많았다 <그림 1>. 따라서 기둥의 최적단면을 설계하기 위해서는 상시상태를 고려한 최적단면을 $\phi M_n / M_u$ 가 1.1 이하가 되도록 하고, 지진 하중에 대한 검토를 수행할 경우 탄성영역을 초과하는

* 정회원, 한국도로공사 설계처 처장
si4518@ex.co.kr

** 정회원, 한국도로공사 설계처 부장

*** 정회원, 한국도로공사 설계처 차장

**** 정회원, 한국도로공사 설계처 과장

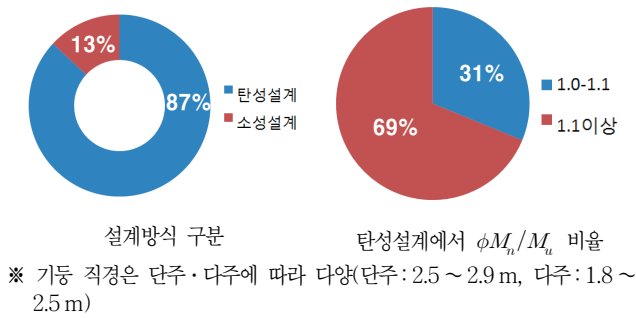


그림 1. 부산외곽선 대상교각 107개소 기둥 설계 방법 및 $\phi M_n/M_u$ 비율 분석

단면에는 소성설계를 적용하도록 유도하는 등 합리적인 기둥설계 방안이 제시될 필요가 있다.

2.2 사용재료

설계방법 및 안전율의 최적화외에 재료선정 측면에 있어서는 고장력 철근의 적용도 기둥 단면의 축소에 영향을 줄 것으로 판단된다. 일반적으로 대부분의 토목 구조물에는 SD400 철근까지 적용되고 있으나 건축 구조물에서는 콘크리트 구조설계기준(1999년) 제정 이후 SD500 이상 철근을 보편적으로 사용하고 있다. 현재 고속도로 교량에서 SD500급의 고장력 철근은 사용하지 않고 있으나 도로교설계기준 4.2.3.2에서 설계에 적용 가능한 철근 항복강도의 상한선으로 500 MPa을 제시하고 있으며, 전단철근의 경우는 400 MPa 이하를 적용하여 설계하도록 규정되어 있다. 국내 콘크리트 구조설계기준에서는 철근의 항복강도 f_y 의 최대값을 550 MPa까지 허용하고 있다. 한국콘크리트학회의 논문(콘크리트 구조물에 대한 고장력 철근 적용성 연구)에서는 철근콘크리트보의 주철근을 SD600으로 사용해도 큰 문제가 없는 것으로 검토되었다. 또한 해외의 경우를 살펴보면 Eurocode 2에서는 f_y 의 범위를 400 ~ 600 MPa로 규정하고 있으며, AASHTO Standard Specifications의 경우 f_y 를 6만 psi(420 MPa)까지 허용하고 있다. 국내의 경우 잠실 갤러리아 팰리스 등 다수의 건축 구조물과 부산 ~ 거제간 연결도로 거가대교 주탑, 슬래브 및 침매터널 등의 토목 구조물에 500 MPa의 고장력 철근을 사용한 사례가 있다. 고장력 철근은 이미 국내에서도 생산이 가능한 상황이므로 기둥, 기초 및 코핑에 현행 설계기준 내에서 고장력 철근 사용이 가능할 것으로 판단된다. 고장력 철근의 적용부위에 있어 본 검토에서는 기초·기둥의 경우 휨 또는 휨·압축에 지배되므로 주철근에 고장력 철근(500 MPa)을 적용해 보았으며, 코핑부에 적용되는 전단철근의 경우 전단내력 확보여부 검증이 필요할 것으로 판단되어 향후 적용성 검증 후 검토하기로 하였다.

2.3 기둥단면 철근비

현 설계 관행은 경제성을 고려하여 0.5 ~ 1.5% 내외의 최소 철근비로 배근하고 있다. 도로교설계기준은 압축부재의 철근 단면적을 기둥전체 단면적의 1 ~ 6%, 유효단면적(최소 전체단면적의 1/2 이상)의 1% 이상으로 규정하고 있으며, 내진설계와 관련하여 축방향철근 단면적을 기둥전체 단면적의 1 ~ 6%로 규정하고 있다. 그 외 콘크리트 구조설계기준(2007)은 전체단면적의 1% 이상 8% 이하의 철근량을 사용할 것을 규정하고 있으며, 유럽과 미국의 경우 콘크리트구조설계기준과 비슷한 양을 적용하고 있다<표 1>.

따라서 본 검토에서는 단면결정기준 기둥에 대하여 철근비를 전체단면적의 2 ~ 3%로 적용하는 것을 검토하였고, 그 외 기둥에 대해서는 탄성, 소성설계 기둥을 구분하여 탄성설계기둥에 대해서는 유효단면적의, 소성설계기둥은 전체 단면적의 1% 이상을 적용하는 것을 검토하였다.

2.4 교각 형식

대부분의 경우 설계상의 편의에 의해 단주식 교각을 선호하는 경향을 보인다. 현재 실시설계가 완료된 부산외곽순환선의 교각 107개를 조사한 결과 단주식 교각은 91개소로 85%의 비중을 보였고, 다주식 교각은 16개소로 15%에 그치는 것으로 나타났다. 단면 설계의 효율성에 대한 검토없이 단주식, 다주식 교각을 임의로 사용하는 것은 경제적으로 불리한 결과를 초래할 가능성이 있는 것으로 판단된다. 따라서 본 검토에서는 단주식 교각을 다주식 교각으로 설계하는 경우를 비교·분석하여 최적 설계 방안을 검토하였다.

3. 교각 기둥설계 최적화 검토

교각 기둥의 최적 설계를 위해서 기둥 단면은 소성설계 유도

표 1. 기둥 철근비에 대한 국내·외 설계기준

구분	주요 내용	비고
콘크리트 구조설계기준(2007)	· 전체단면적의 1% 이상 8% 이하	유효단면적 적용
유럽 (Eurocode 2)	· 최소철근량은 다음 중 큰 값이상 $A_{s,min} = (0.10 N_{Ed} / f_{yd})$ 또는 $0.002 A_c$ N_{Ed} : 설계축력, f_{yd} : 철근의 설계항복강도	-
미국 (ACI 2002)	· 전체단면적의 1% 이상 8% 이하	유효단면적 적용
AASHTO LRFD	· $(A_s \cdot f_y / A_g \cdot f'_c + A_{ps} \cdot f_{pu} / A_g \cdot f'_c) \geq 0.135$ 단, 최대 8% 이하	-

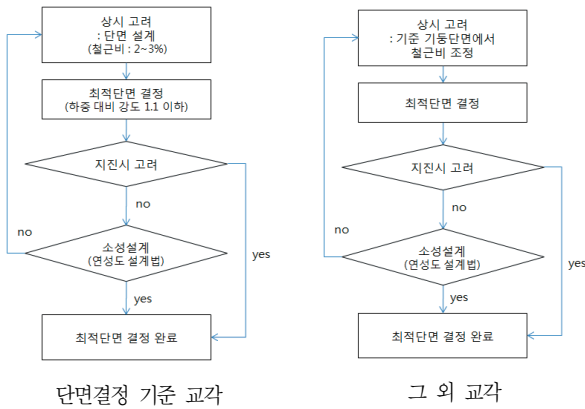


그림 2. 기둥 슬림화 및 최적설계 흐름도

를 통한 최적화를 기본으로 하였다<그림 2>. 또한 기둥 및 기초 전단철근(띠철근)은 고장력 철근 적용시 배근간격이 넓어져 취성파괴 및 사인장 균열폭의 확대가 우려되므로 항복강도 400 MPa 이하의 철근을 적용·검토하였다.

3.1 고장력 철근 사용 및 철근비 조정

최적 설계 검토를 위해 10m 높이의 단주식 기둥에 현행 설계와 철근비를 조정한 경우 및 고장력 철근을 적용하고 철근비를 조정한 경우를 비교 검토하였다. 고장력 철근을 사용한 경우 철근비는 최대 3%를 적용한 경우와 최적으로 적용한 경우로 나누어 검토하였으며 적용한 방법을 요약하면 <표 2>와 같다.

검토 결과 철근비만 조정된 경우에는 단면 크기가 현행 설계보다 0.5m 줄어들어 콘크리트량은 약 8m³ 가량 감소하는 것으로 나타났지만 철근량은 1.329 ton, 직접공사비는 약 1% 증가하고 CO₂는 0.35 ton 정도가 더 발생했다. 고장력 철근을 사용하고 철근비를 최대값 3%로 적용한 경우 단면 규격 및 콘크리트 사용량은 각각 0.6m, 9.3m³ 정도 감소하지만, 철근량은 2.3 ton, 직접공사비는 약 1.2% 증가, CO₂ 발생은 2.15 ton 정도 증가하는 것으로 나타났다. 고장력 철근을 사용하고 철근비를 2.62%로 최적화한 경우 단면 규격은 0.7m 감소, 콘크리트량

표 2. 단주식 교각의 철근비 및 고장력 철근의 검토안

구분	1안 (현설계)	2안 (철근비조정)	3안 (고강철근+철근비조정)	4안 (고강철근+철근비조정)
콘크리트 강도	코핑	40 MPa	40 MPa	40 MPa
	기둥	27 MPa	27 MPa	27 MPa
	기초	27 MPa	27 MPa	27 MPa
철근 항복 강도	코핑	400 MPa	400 MPa	400 MPa
	기둥	400 MPa	400 MPa	500 MPa
	기초	400 MPa	400 MPa	500 MPa
철근비	1.22%	2.58%	3.00%	2.62%

및 철근량은 각각 10.6 m³, 0.1 ton이 감소하였으며, 공사비는 약 0.3% 정도 절감되었다. CO₂ 발생은 다른 경우에 비해 약 4 ton 가량 감소하는 효과가 있는 것으로 나타났다<표 3>.

3.2 단주식 및 다주식 기둥 비교

단주식으로 설계된 기둥을 다주식 설계로 변경했을 경우를 검토하기 위해 개선방안으로 설계된 단주식 교각 4안과 기초의 형태가 다른 다주식 교각을 비교하였다. 다주식 교각의 기초 형태는 일체형과 분리형으로 구분하였으며 적용한 방법을 요약하면 <표 4>와 같다.

단주식 기둥을 다주식으로 설계한 경우 단면의 크기는 0.5m 가 줄어든 것을 확인할 수 있었다. 다주식에 일체형 기초를 사용한 경우 콘크리트량은 19 m³이 증가했지만 철근량은 5.6 ton, 직접공사비는 약 2.4%, CO₂는 6.39 ton이 감소하였다. 다주식 기둥에 분리형 기초를 사용한 경우는 콘크리트량과 철근의 사용량이 각각 15.7 m³, 7.5 ton 감소하였고 직접공사비를 약 6.9% 절감할 수 있었으며 CO₂ 발생은 23 ton을 감소시키는 것으로 나타났다<표 5>.

표 3. 철근비 및 고장력 철근 적용 검토결과

구분	1안 (현설계)	2안 (철근비조정)	3안 (고강철근+철근비조정)	4안 (고강철근+철근비조정)
단면규격 (m)	적용	2.2	1.7	1.6
	비교	-	-0.5	-0.6
콘크리트량(m ³)	적용	148.729	140.764	139.416
	비교	-	-7.965	-9.313
철근량 (ton)	적용	22.518	23.847	24.812
	비교	-	+1.329	+2.294
직접공사비(천원)	적용	130,050	131,382	131,638
	비교	-	증 1.0%	증 1.2%
CO ₂ (ton)	적용	104.15	104.50	106.30
	비교	-	+0.35	+2.15

표 4. 단주식 및 다주식 교각의 검토안

구분	1안 (단주식 개선)	2안 (다주식+일체형 기초)	3안 (다주식+분리형 기초)
콘크리트 강도	코핑	40 MPa	40 MPa
	기둥	40 MPa	40 MPa
	기초	27 MPa	27 MPa
철근 항복 강도	코핑	400 MPa	400 MPa
	기둥	500 MPa	500 MPa
	기초	500 MPa	500 MPa
철근비	2.58%	2.95%	2.95%

표 5. 다주식 교각 적용 검토결과

구분	1안 (단주식 개선)		2안 (다주식+일체형 기초)		3안 (다주식+분리형 기초)	
	적용	비고	적용	비고	적용	비고
단면규격 (m)	적용	1.5	1.0	1.0	1.0	
	비고	-	-0.5	-0.5		
콘크리트 량(m ³)	적용	138.151	157.268	122.492		
	비고	-	+19.117	-15.659		
철근량 (ton)	적용	22.419	16.862	14.881		
	비고	-	-5.557	-7.538		
직접공사 비(천원)	적용	129,662	126,512	120,703		
	비고	-	감 2.4%	감 6.9%		
CO ₂ (ton)	적용	100.26	93.87	77.2		
	비고	-	-6.39	-23.06		

3.3 고교각 기둥 적용시 비교 검토

교각의 높이가 10 m를 넘지 않는 단주식 교각 설계 시 기존의 방법보다 개선안을 적용하는 것이 더 효율적인 것이 확인되었다. 이러한 효과는 고교각에서 더 크게 나타날 것으로 예상된다. 따라서 본 검토에서는 20 m 높이의 고교각에 대해 현행 설계와 개선안을 비교하여 최적 설계 방안을 검토하여 보았다. 비교안은 개선된 설계방법을 적용한 다주식 교각과 분리형 기초를 갖는 다주식 교각으로 선정하였고 적용한 방법을 요약하면 <표 6>과 같다.

검토 결과 현행대로 설계된 단주식 교각에 비해 개선된 다주식 교각은 단면이 0.7 m, 콘크리트량과 철근량은 각각 37 m³, 5.7 ton이 감소하였고, 분리형 기초를 갖는 다주식 교각은 단면은 1.2 m, 콘크리트량과 철근량은 각각 53.7 m³, 10.3 ton이 감소하는 것으로 나타났다. 공사비와 CO₂ 발생량은 단주식 개선의 경우 6.5%, 26.3 ton을 절감할 수 있는 것으로 나타났고, 분리형 기초의 다주식 교각은 9.3%, 42.7 ton을 절감할 수 있는 것으로 나타났다<표 7>.


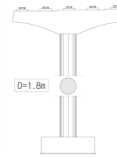
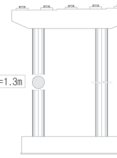
4. 맺음말

본 검토에서는 소성설계 유도를 통한 최적화를 바탕으로 고장력 철근과 철근비를 조정하고, 구조 형식을 다주식으로 변화시켜 경제성 및 친환경성을 평가하였다. 현재 설계 방법과 개선안


표 6. 고교각의 검토안

구분	1안 (현설계)		2안 (단주식 개선)		3안 (다주식+분리형 기초)	
	코핑	기둥	기초	코핑	기둥	기초
콘크리트 강도	코핑	40 MPa	40 MPa	40 MPa	40 MPa	40 MPa
	기둥	40 MPa	40 MPa	40 MPa	40 MPa	40 MPa
	기초	27 MPa	27 MPa	27 MPa	27 MPa	27 MPa
철근 항복 강도	코핑	400 MPa	400 MPa	400 MPa	400 MPa	400 MPa
	기둥	400 MPa	500 MPa	500 MPa	400 MPa	500 MPa
	기초	400 MPa	500 MPa	500 MPa	400 MPa	500 MPa
철근비	1.84%	2.10%	2.81%			

표 7. 20 m 높이 고교각 검토결과

구분	1안 (현설계)		2안 (단주식 개선)		3안 (다주식+분리형 기초)	
	적용	비고	적용	비고	적용	비고
단면도						
	단면 규격	적용	2.5 m	1.8 m	1.3 m	
	비고	-	-	-0.7 m	-1.2 m	
콘크리트 량(m ³)	적용	210.116	172.907	156.388		
	비고	-	-37.209	-53.728		
철근량 (ton)	적용	35.917	30.180	25.608		
	비고	-	-5.737	-10.309		
직접공사 비(천원)	적용	173,682	162,247	157,580		
	비고	-	감 6.5%	감 9.3%		
CO ₂ (ton)	적용	156.75	130.45	114.03		
	비고	-	-26.30	-42.72		

을 비교해 본 결과, 고장력 철근을 이용하고 철근비를 조정하는 것이 콘크리트량과 철근량을 줄여 경제적인 설계를 유도하고 CO₂ 발생량도 기존에 비해 상당량 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 개선된 설계 방법을 현재 실시설계중인 함양~울산(교각 947기), 당진~천안(교각 136기)에 적용할 경우 공사비는 약 6억원이 절감되고, CO₂ 발생량은 4,318 ton이 저감되는 것으로 나타났다. 철근량과 철근비 조정에 더불어 다주식 교각을 다주식으로 설계할 경우 공사비는 139억원, CO₂는 25,597 ton을 저감할 수 있는 것으로 나타났다. 이러한 절감 효과는 교각의 높이가 높은 고교각일수록 더 크게 나타나는 경향을 확인할 수 있었다. 개선된 방안으로 설계한 고교각의 절감 효과를 현재 실시 설계 중인 함양~울산, 당진~천안에 적용 시 CO₂는 47,419 ton이 저감, 공사비는 178억원이 절감되는 것으로 예상되었으며, 또한 2020년까지 시행될 고속도로 사업(총 연장 933.9 km, 약 187개공구) 적용시 CO₂는 253,353 ton이 저감, 공사비는 951억원이 절감되는 것으로 예상되었다.

이처럼 고장력 철근을 사용하고 철근비를 조절하는 방안을 통해 합리적인 구조 설계가 가능하고 단면 크기를 줄여 콘크리트량 및 철근량을 감소시킬 수 있는 것으로 나타났다. 개선된 방안을 현행 설계에 적용할 경우 경제적 파급효과가 크고, CO₂ 발생 또한 억제되어 친환경적인 구조물 시공을 가능하게 할 것으로 판단되며, 슬림한 형상으로 경관미도 개선될 것으로 판단된다. 따라서 추후 교각 설계시에는 본 검토에서 제시된 개선방안을 적극 검토하는 것이 바람직할 것으로 생각된다. 

담당 편집위원 :
차수원(울산대학교) chasw@ulsan.ac.kr