교량 슬림화 및 최적화를 위한 교각 설계 개선방안 검토

제공처 : 한국도로공사 설계처

출처 : 2011년도 고속도로 설계 실무자료집(2012, 한국도로공사)

1. 일반현황

(1) 그간 고속도로 설계 시 시공능력, 품질관리, 재료의 불균일성 등의 이유로 단면을 과다 설계하는 관행이 있었으나, 현재 우리나라는 국가 경제 규모가 세계 15위로서 선진국 대열에 들어서면서 발주자, 설계자, 시공자 간의 신뢰 가능한 사회로 성숙되었고,

(2) 경제성을 우선 시하는 설계에서 저탄소 녹색성장 중심의 시대적 요구 변화에 따라,

(3) 고속도로 교량 교각의 기둥 단면 슬림화 및 최적화를 통해 경제성 외에 미관, CO2 저감 등을 종합적으로 고려한 친환경 고속도로 건설을 추진코자 함.

2. 현황 및 문제점

2.1 구조물 단면 축소관련 추진 경위

일 자	주요 내용	비 고
2000. 5. 22	· 원형 교각 단면 적정성 검토 *단면력 효율이 80%(75~85%)가 되도록 설계 *2단철근 필요시 경제적인 단면 적용	설계이 13201-205
2005. 6. 30	· 압축부재 축방향 철근량 설계기준 개선 *최소철근비 : 1%, 감소된 유효단면적은 총단면적의 1/2이상	기술심사실 -1043
2006. 12. 12	· 중소지간 PSC I형 거더교량의 면진받침 적정성검토 *교고 20m이상시 면진받침 적용시 전체공사비 절감(약 11%) *교각(약 20m이상) 교량받침 설계시 면진받침과 탄성 받침의 경제성 및 안정성 등 비교·검토하여 적용	설계처 -3241
2008. 7. 23	· 교량구조용 압연강재(HSB) 적용 검토 *HSB 500, HSB 600 설계적용	설계처 -1988
2009. 9. 8	· 교각 단면효율 조정 *(당초)80%수준 (변경)단면효율을 최대한 활용	설계처 -4632
2009. 11. 30	· 고강도 콘크리트(40MPa) 교각 설계적용 검토 *(당초) 27Mpa (변경) 40MPa	설계처 -5922
2010. 4. 14	· 저탄소 녹색성장 기본법 시행 *국가 온실가스 감축목표 : 2020년까지 배출전망치 대비 30%감축)	환경부
2010. 7. 30	· 압축부재의 최소 축방향 철근량 적용(안) *Kl/r 검토하는 경우 전체단면적에 대해 검토 감소된 유효단면적을 사용하여 최소철근량과 설계강도 결정	기술심사처 -1531

2.2 적용실태

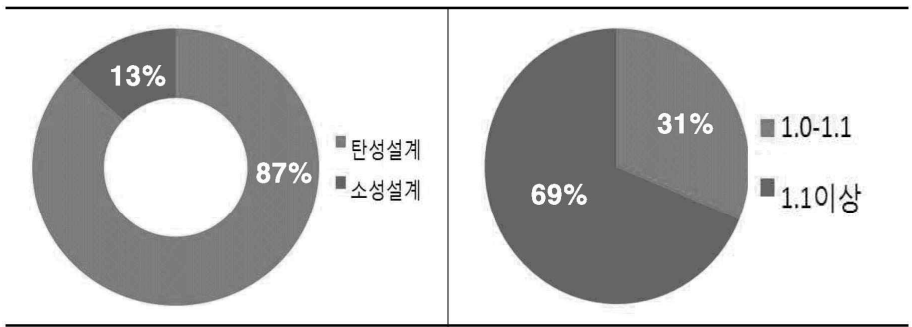
2.2.1 기둥설계 관행

(1) $\phi Mn/Mu \geq 1.1$ 이상으로 과다설계 다수

(2) 탄성설계 내에서 단면 결정하는 경향 다수

(2.1) 소성설계에 비해 단면 규격이 커짐

(3) 적용실태 분석(대상 : 부산외곽선 대상교각 107개소)



탄·소성 구분 | 탄성설계 구간 ϕMn/Mu 비율

*기둥 직경이 단주·다주에 따라 다양(단주:2.5~2.9m, 다주:1.8~2.5m)

(4) 콘크리트 단면 슬림화 한계

(4.1) 콘크리트 강도 상향에 따른 단면 감소효과 미미

구 분	당 초	변 경	비고
콘크리트 강도	27MPa	40MPa	
단면 규격	2.7m	2.5m	△0.2m

(5) 단면축소를 위해 콘크리트 강도 상향시 수화열에 의한 온도균열 제어로 인하여 콘크리트 강도 상향 제약

(5.1) 합리적인 기둥설계 방안 마련 필요

2.2.2 고장력 철근 적용 실태

(1) 현재 고속도로 교량은 SD400 철근까지 적용 중

(1.1) 거의 대부분 토목구조물에 SD400 적용

(2) 건축구조물에서는 SD500 이상 철근을 보편적으로 사용 중임

(3) 국내 적용 현황

구 분	주 요 내 용	비 고
건축분야	· 콘크리트구조설계기준(1999년) 제정 이후 500MPa 보편적으로 사용 * 잠실 갤러리아팰리스, 마포오벨리스크 등 다수	
토목분야	· 부산~거제간 연결도로 * 거가대교 주탑, 슬라브, 침매터널 등 500MPa 철근 적용	

(4) 현재 고속도로 교량에서는 SD500급 고장력철근 미 적용

(4.1) 고장력철근 적용방안 검토 필요

2.2.3 기둥 철근비

(1) 우리공사 설계기준 『원형교각 단면 적정성 검토, 설계이 13201-205(2000.05.22)』 상 Con’c 단면 조정만으로 최적단면 도출

(2) 현 설계 관행은 경제성 고려하여 0.5 ~ 1.5% 내외 최소철근비 배근

(2.1) 부재 슬림화의 저해 요인 ⇒ 철근비 조정 필요

2.2.4 기둥 형식

(1) 단주식 교각 선호

(2) 단주식 91개소(85%), 다주식 16개소(15%)

(2.1) 대상 : 부산외곽선 대상교각 107개소

(3) 부재 슬림화 저해 및 공사비 증가 요인

3. 개선내용

3.1 기둥단면 결정 최적화

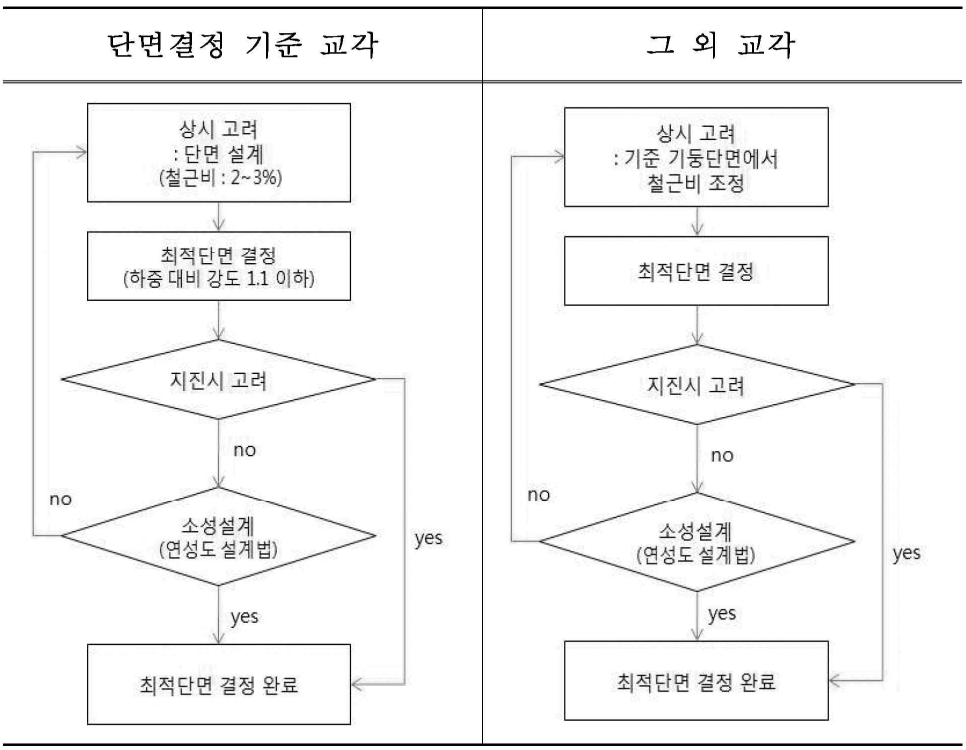
3.1.1 기둥의 소성설계 유도

(1) 상시 고려 최적단면 유도 : $\phi Mn/Mu \leq 1.1$

(2) 최적단면으로 지진 고려 시

구 분	내 용
탄성영역 이내	상시 최적단면으로 결정
탄성영역 초과	상시 최적단면 + 소성설계(연성도 내진설계)

3.1.2 기둥 슬림화 및 최적설계 흐름도



3.2 고장력 철근 적용

3.2.1 관련 시방기준 및 연구 결과

(1) 도로교설계기준 4.2.3.2 강재의 설계강도 및 탄성계수(2010)

(1.1) 철근의 항복강도 f_y는 500MPa 보다 더 큰값으로 설계할 수 없다.

(1.2) 다만, 전단철근 f_y는 400MPa 보다 더 큰값으로 설계할 수 없다.

(2) 콘크리트구조설계기준 3.3.4 철근의 설계강도

(2.1) 철근의 기준 항복강도 f_y는 5,500 kgf/㎠를 초과하지 않아야 한다.

(3) 한국콘크리트학회(콘크리트 구조물에 대한 고장력철근 적용성연구)

(3.1) 철근콘크리트보의 주철근에 SD600 철근을 사용하여도 큰 문제가 없음

3.2.2 해외 설계기준

구 분	주요 내용	비고
유럽(Eurocode2)	· 철근 항복강도 f_{yk} = 400 ~ 600MPa	
미국(ACI-318)	· 철근 항복강도 f_y = 60,000 psi(420MPa) 초과할 수 없다.	

3.2.3 적용사례 및 국내 생산업체 현황 검토

(1) 고장력철근(f_y=500MPa) 국내 적용사례 다수

(1.1) 적용사례 : 잠실캘러리 아팰리스 등 다수(건축), 부산~거제간 연결도로 거가대교 주탑, 슬라브, 침매터널 등(토목) 500MPa 적용

(2) 고장력철근 및 커플러 국내 생산 가능

(2.1) 현행 설계기준 내에서 고장력철근(SD500) 사용가능

3.2.4 현장 적용성 검토

(1) 철근 가공조립 검토

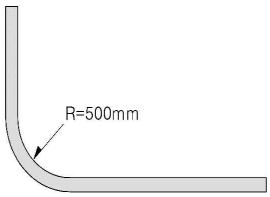
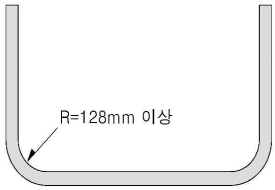
(1.1) 기둥 및 기초 주철근은 내면반지름 128mm이상으로 가공하여 적용가능

(1.2) 기둥 및 기초철근은 대부분 D19 ~ D32 적용 다수

* 도로교설계기준 4.3.4.2 철근 구부리기(표 4.3.2)
180° 갈고리와 90° 갈고리의 구부리는 내면반지름은

철근의 지름	최소 내면반지름
D10 ~ D25	$3d_b$
D29 ~ D35	$4d_b$
D38이상	$5d_b$

※ D32의 경우 최소 내면반지름 $4d_b$ = 128mm

	
기둥 주철근	기초 주철근

3.2.5 적용부위 검토

구 분	적 용	세 부 내 용
기 둥	500 MPa	· 기초·기둥에서는 휨 또는 휨·압축에 지배되므로 주철근을 500MPa를 적용하고, 전단철근(띠철근)은 400MPa까지 적용
기 초	500 MPa	· 코핑에서는 대부분 전단에 지배되므로 일률적으로 400MPa 적용
코 핑	400 MPa	* 전단철근에 고장력 철근 적용시 문제점 : 철근 배근간격 넓어져, 취성파괴 및 사인장 균열폭 확대 우려 ※ 고장력 전단철근의 전단내력 확보여부 검증 필요

3.3 기둥 철근비 조정

3.3.1 도로교 설계기준

(1) 압축부재의 철근

(1.1) 축방향철근 단면적은 기둥전체 단면적의 1 ~ 6%

(1.2) 유효단면적(최소 전체단면적의 1/2 이상) 1% 이상

(2) 내진설계 6.8.3.3

(2.1) 축방향철근 단면적은 기둥전체 단면적의 1 ~ 6%

3.3.2 그 외 국내 · 외 설계기준

구 분	주요 내용	비고
콘크리트구조 설계기준(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	· $(A_S \cdot f_y / A_g \cdot f'_c + A_{ps} \cdot f_{pu} / A_g \cdot f'_c) \geq 0.135$ * 최대 8%이하	

3.3.3 기둥 철근비 개선방안 검토

(1) 철근비 조정에 따른 단면 비교(붙임 1 참조)

구 분	1안 (현설계)	2안 (철근비조정)	3안 (고강철근+철근비조정)	4안 (고강철근+철근비조정)
철 근 비	1.22%	2.58%	3.00%	2.62%
단 면 규 격	2.2m	1.7m	1.6m	1.5m

(2) 단면결정 기준 기둥 : 전체단면적의 2~3% 적용

(3) 그 외 기둥

구 분	적 용	비고
탄성설계 기둥	유효단면적의 1%이상	탄성영역 내에 내진 저항
소성설계 기둥	전체단면적의 1%이상	탄성영역 외(소성영역)에서 내진 저항

3.4 단주식 및 다주식 기둥 비교

3.4.1 단주식을 다주식으로 변경시

(1) 교각 1기당 단면규격 0.5m, 콘크리트 약 16㎥, 철근 약 8ton절감 및 교각 슬림화 가능

구 분		단주식	2주식		비고
			일체형 기초	분리형 기초	
콘크리트 강도	기둥	40MPa	40MPa	40MPa	
	기초	27MPa	27MPa	27MPa	
철근 항복강도		500MPa	500MPa	500MPa	
철 근 비		2.62%	2.93%	2.95%	
단 면 규 격		1.5m	1.0m	1.0m	△0.5m
콘크리트량(㎥)		138.151	157.268	122.492	△15.659
철 근 량(ton)		22.419	16.862	14.881	△7.538
직접공사비(천원)		129,662	126,512	120,703	△8,959
CO_2(ton)		100.26	93.87	77.20	△23.06

4. 결론

4.1 검토결론

(1) 기둥단면 소성설계 유도를 통한 최적화

(2) 고장력철근 적용

(2.1) 기둥 · 기초부 : 항복강도 f_y = 500MPa 적용

(2.2) 코핑부 : 항복강도 f_y = 400MPa 적용

(2.2.1) 기둥 · 기초 전단철근(띠철근) : 항복강도 f_y = 400MPa 이하

(3) 철근비 조정

(3.1) 단면결정 기준 기둥 : 철근비 전체단면적의 2~3% 적용

(3.2) 그 외 기둥

구 분	적 용	비고
탄성설계 기둥	유효단면적의 1%이상	탄성영역 내에서 내진 저항
소성설계 기둥	전체단면적의 1%이상	탄성영역 밖에서 내진 저항

(4) 교각형식 다양화

(4.1) 설계 시 미관, 경제성, 하부공간 활용 등 종합적 검토 후 단주식 또는 다주식 결정

4.2 기대효과

(1) 상기 방침 적용시 단면규격, 경제성 등 검토

(1.1) 교각(H=9.8m) 적용시

구 분	현 설계	개 선		비고
		단주식	다주식	
단면규격	2.2m	1.5m	1.0m	
공사비(천원)	130,050	129,662	120,703	
CO_2(ton)	104.15	100.26	77.20	

(1.1.1) 단주식(개선) : 교각 1기당 단면축소(0.7m), CO_2 3.89ton 저감 및 공사비 약 0.4백만원 절감

(1.1.2) 다주식(개선) : 교각 1기당 단면축소(1.2m), CO_2 26.95ton 저감 및 공사비

약9백만원 절감

(1.2) 교각(H=20.0m) 적용시

구 분	현 설계	개 선		비고
		단주식	다주식	
단면규격	2.5m	1.8m	1.3m	
공사비(천원)	173,682	162,247	157,580	
CO_2(ton)	156.75	130.45	114.03	

(1.2.1) 단주식(개선) : 교각 1기당 단면축소(0.7m), CO_2 26.3ton 저감 및 공사비 약 11백만원 절감

(1.2.2) 다주식(개선) : 교각 1기당 단면축소(1.2m), CO_2 42.72ton 저감 및 공사비 약16백만원 절감

(2) 현재 실시설계중인 노선(함양~울산 및 당진~천안) 적용시(H=20.0m)

(2.1) 단주식(개선) 적용시

(2.1.1) CO_2 29,193ton 저감 및 공사비 약 122억원 절감

(2.2) 다주식 기둥 적용시

(2.2.1) CO_2 47,419ton 저감 및 공사비 약 178억원 절감

(2.3) 함양~울산(교각개수) : 974EA, 당진~천안(교각개수) : 136EA

4.3 적용방안

(1) 설계중 노선 : 현재 설계중인 노선부터 적용

(2) 공사중인 노선 : 신규 · 변경 설계 교량에 적용 · 검토

5. 기타

5.1 교각 설계 비교 · 검토

(1) 단주식 기둥(고장력철근 및 철근비 조정) 비교 검토

구 분		1안 (현설계)	2안 (철근비조정)	3안 (고강철근+철근비조정)	4안 (고강철근+철근비조정)
콘크리트 강도	기둥	40MPa	40MPa	40MPa	40MPa
	기초	27MPa	27MPa	27MPa	27MPa
철근 항복 강도	기둥	400MPa	400MPa	500MPa	500MPa
	기초	400MPa	400MPa	400MPa	500MPa
철 근 비		1.22%	2.58%	3.00%	2.62%
단 면 규 격		2.2m	1.7m	1.6m	1.5m
콘크리트량(㎥)		148.729	140.764	139.416	138.151
철 근 량(ton)		22.518	23.847	24.812	22.419
직접공사비(천원)		130,050	131,382	131,638	129,662
CO_2(ton)		104.15	104.50	106.30	100.26

(1.1) 함양~울산(974기), 당진~천안(136기) 실시설계 적용 시 CO_2 4,318ton 저감 및 공사비 약 6억원 절감

(1.1.1) 교각 1기당 적용 시 CO_2 3.89ton 저감 및 388천원 절감

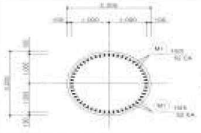
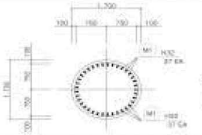
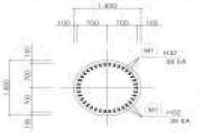
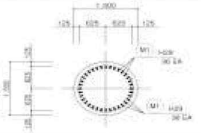
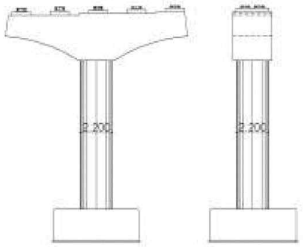
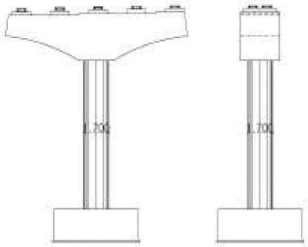
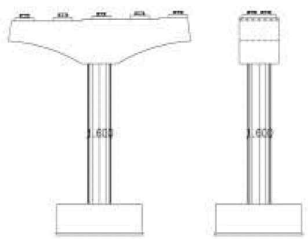
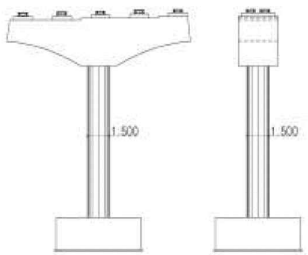
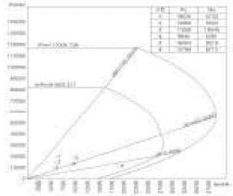
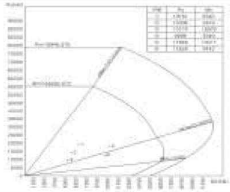
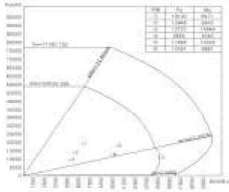
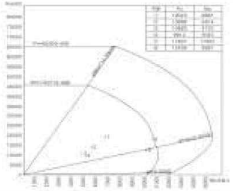
(2) 단주식 및 다주식 기둥 비교

구 분		단주식	2주식		비고
			일체형 기초	분리형 기초	
콘크리트 강도	기둥	40MPa	40MPa	40MPa	
	기초	27MPa	27MPa	27MPa	
철근 항복강도		500MPa	500MPa	500MPa	
철 근 비		2.62%	2.93%	2.95%	
단 면 규 격		1.5m	1.0m	1.0m	
콘크리트량(㎥)		138.151	157.268	122.492	
철 근 량(ton)		22.419	16.862	14.881	
직접공사비(천원)		129,662	126,512	120,703	
CO_2(ton)		100.26	93.87	77.20	

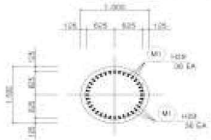
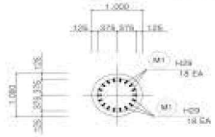
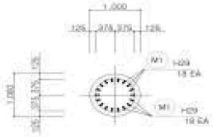
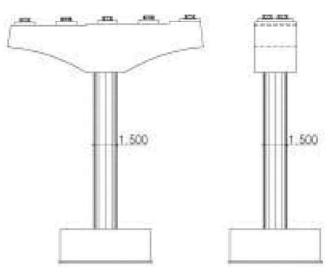
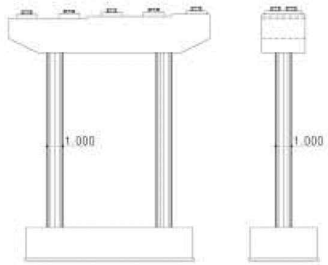
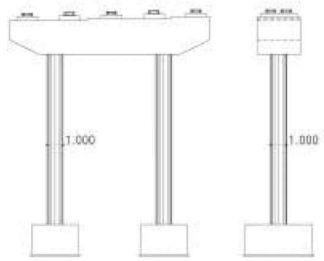
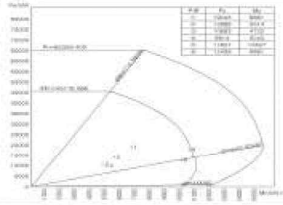
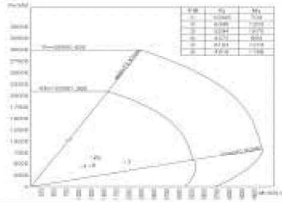
(2.1) 함양~울산(974기), 당진~천안(136기) 실시설계 적용 시 CO_2 25,597ton 저감 및 공사비 약 139억원 절감

(2.1.1) 교각 1기당 적용 시 CO_2 23.06ton 저감 및 8,959천원 절감

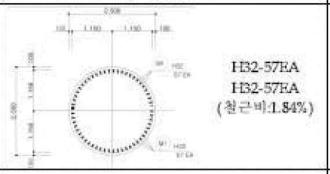
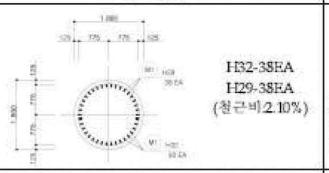
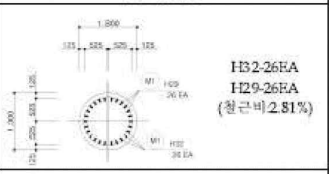
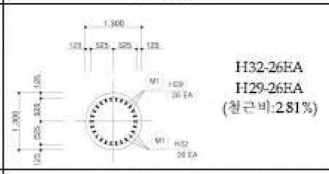
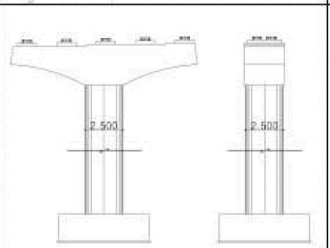
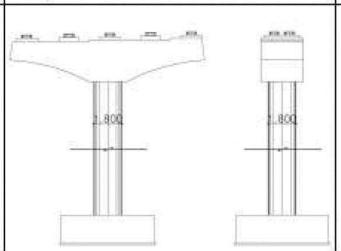
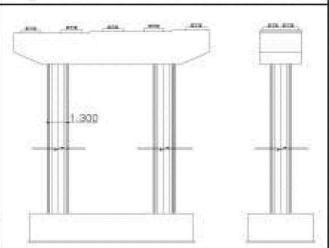
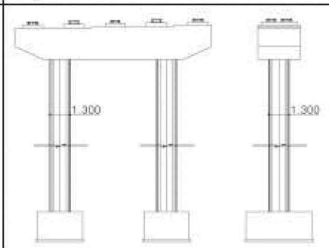
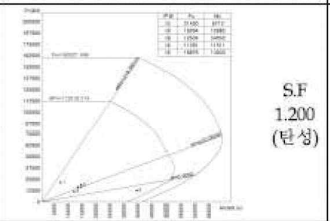
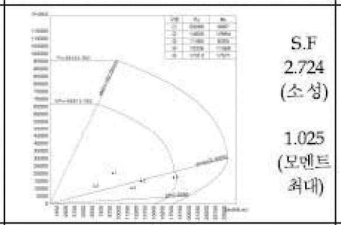
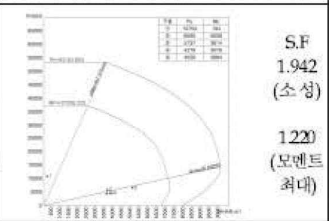
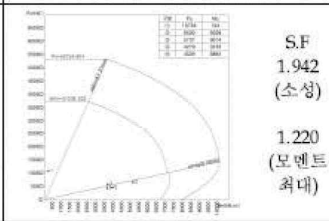
5.2 단주식 기둥 비교 검토

구 분		Case-1(현설계)	Case-2	Case-3	Case-4	비 고
교 각 P1 (H=9.8m)	재 료 강 도	코 핑: fck = 40MPa, fy = 400MPa 기 둥: fck = 40MPa, fy = 400MPa 기 초: fck = 27MPa, fy = 400MPa	코 핑: fck = 40MPa, fy = 400MPa 기 둥: fck = 40MPa, fy = 400MPa 기 초: fck = 27MPa, fy = 400MPa	코 핑: fck = 40MPa, fy = 400MPa 기 둥: fck = 40MPa, fy = 500MPa 기 초: fck = 27MPa, fy = 400MPa	코 핑: fck = 40MPa, fy = 400MPa 기 둥: fck = 40MPa, fy = 500MPa 기 초: fck = 27MPa, fy = 500MPa	
	직 경	D=2.2M	D=1.7M	D=1.6M	D=1.5M	
	기 둥 단면도	 H25-52EA H22-52EA (철근비:1.22%)	 H32-37EA H32-37EA (철근비:2.58%)	 H32-38EA H32-38EA (철근비:3.00%)	 H29-36EA H29-36EA (철근비:2.62%)	
	정면도 및 측면도					
	P-M 상관도	 S.F 1.265 (탄성)	 S.F 1.017 (탄성)	 S.F 1.004 (탄성)	 S.F 2.183 (소성) 1.010 (모멘트 최대)	
	콘크리트량(㎥)	148.729	140.765	139.417	138.151	
	철근량(TON)	22.518	23.847	24.182	22.419	
	순공사비(원)	130,049,735	131,382,432	131,638,088	129,661,723	

<단주식 및 다주식 비교 검토>

구 분		Case-1(단주식 개선)	Case-2(다주식, 일체형기초)	Case-3(다주식, 분리형 기초)	비 고
교 각 P1 (H=9.8m)	재 료 강 도	코 핑 fck = 40MPa fy = 400MPa 기 둥 fck = 40MPa fy = 500MPa 기 초 fck = 27MPa fy = 500MPa	코 핑 fck = 40MPa fy = 400MPa 기 둥 fck = 40MPa fy = 500MPa 기 초 fck = 27MPa fy = 500MPa	코 핑 fck = 40MPa fy = 400MPa 기 둥 fck = 40MPa fy = 500MPa 기 초 fck = 27MPa fy = 500MPa	
	직 경	D=1.5M	D=1.0M	D=1.0M	
	기 둥 단면도	 H29-36EA H29-36EA (철근비:2.62%)	 H29-20EA H25-20EA (철근비:2.95%)	 H29-18EA H29-18EA (철근비:2.95%)	
	정면도 및 측면도				
	P-M 상관도	 S.F 2.183 (소 성) 1.010 (모멘트 최대)	 S.F 1.599 (소 성)	 S.F 1.599 (소 성)	
	콘크리트량(㎥)	138.151	157.268	122.492	
	철근량(TON)	22.419	16.862	14.881	
	순공사비(원)	129,661,723	126,511,719	120,703,157	

5.3 고교각(H=20.0m) 기둥 비교 검토

구 분		단주식(현설계)	단주식 개선	다주식 개선(일체형기초)	다주식 개선(분리형 기초)	비 고
교 각 P1 (H=20.0m)	재 료 강 도	코 핑: fck = 40MPa, fy = 400MPa 기 둥: fck = 40MPa, fy = 400MPa 기 초: fck = 27MPa, fy = 400MPa	코 핑: fck = 40MPa, fy = 400MPa 기 둥: fck = 40MPa, fy = 500MPa 기 초: fck = 27MPa, fy = 500MPa	코 핑: fck = 40MPa, fy = 400MPa 기 둥: fck = 40MPa, fy = 500MPa 기 초: fck = 27MPa, fy = 500MPa	코 핑: fck = 40MPa, fy = 400MPa 기 둥: fck = 40MPa, fy = 500MPa 기 초: fck = 27MPa, fy = 500MPa	
	직 경	D=2.5M	D=1.8M	D=1.3M	D=1.3M	
	기 둥 단면도	 H32-57EA H32-57EA (철근비:1.84%)	 H32-38EA H29-38EA (철근비:2.10%)	 H32-26EA H29-26EA (철근비:2.81%)	 H32-26EA H29-26EA (철근비:2.81%)	
	정면도 및 측면도					
	P-M 상관도	 S.F 1.200 (탄성)	 S.F 2.724 (소성) 1.025 (모멘트 최대)	 S.F 1.942 (소성) 1.220 (모멘트 최대)	 S.F 1.942 (소성) 1.220 (모멘트 최대)	
	콘크리트량(㎥)	210.116	172.907	191.164	156.388	
	철근량(TON)	35.917	30.180	27.921	25.608	
	순공사비(원)	173,682,235	162,247,260	163,777,599	157,580,470	