기둥 철근배근 시공성 개선을 위한 연성도 내진설계법 적용 방안

제공처 : 한국도로공사 설계처

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

1. 일반현황

(1) 도로교설계기준(2010년)에 연성도 내진설계법이 부록에 추가되어, 이를 적용할 경우, 철근량을 합리화하여 시공성을 향상시킬 수 있는 바,

(2) 설계 실무 적용을 위해 이에 대한 세부 적용방안을 마련코자 함

2. 현황 및 문제점

2.1 추진경위

(1) 2010. 9 : 도로교설계기준 개정

(1.1) 연성도내진설계법 부록에 추가

(2) 2011. 8 : 연성도내진설계법 적용을 위한 설계자문 의뢰

(2.1) 영남대 이재훈 교수 외 5인

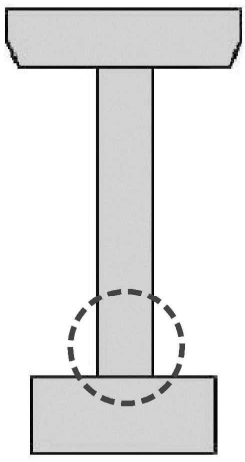
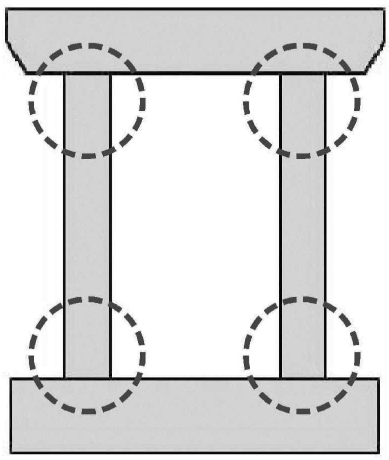
(2.2) 설계자문 안건 : P-Δ 효과 고려한 모멘트 산정 등

(3) 2011. 8 : 연성도내진설계법 적용방안 설계자문 결과 통보

2.2 현 설계기준

완전연성 내진설계법 : 2010년 도로교설계기준 본문

2.2.1 검토단면

단 주 식	다 주 식
	

2.2.2 심부구속철근량 산정 방법

원형기둥	사각기둥
원형기둥의 나선철근비는 다음 값들 중 큰 값을 취한다. $\rho_s = 0.45[\frac{A_g}{A_c} - 1]\frac{f_{ck}}{f_y}$ or $\rho_s = 0.12\frac{f_{ck}}{f_y}$ $A_s = \frac{\rho_s \, s \, d_c}{4}$ 여기서, s : 횡방향 철근 간격 d_c : 피복두께	사각형 기둥에서 횡방향 철근의 총 단면적 A_{sh}는 다음 값들중 큰 값을 취한다. $A_{sh} = 0.30 \, a \, h_c \frac{f_{ck}}{f_y}[\frac{A_g}{A_c} - 1]$ or $A_{sh} = 0.12 \, a \, h_c \frac{f_{ck}}{f_y}$ 여기서, a : 띠철근의 수직간격, 최대 150mm h_c : 띠철근 기둥의 고려하는 방향으로 심부의 단면치수(mm)

2.2.3 문제점

(1) 힘의 비율(단면력 : 작용력)에 관계없이 일률적인 철근 배근

(2) 후프띠철근을 용접 또는 기계적 이음으로 할 경우 고가

(3) 후프띠철근을 갈고리 및 겹이음을 고려하고, 보강띠철근을 시공할 경우 철근량 과다로 시공성 불량

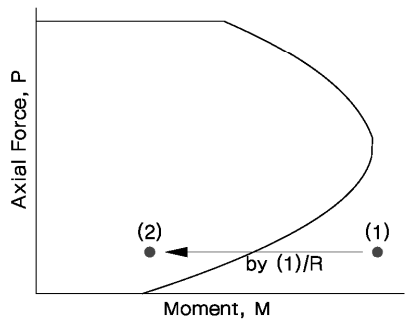
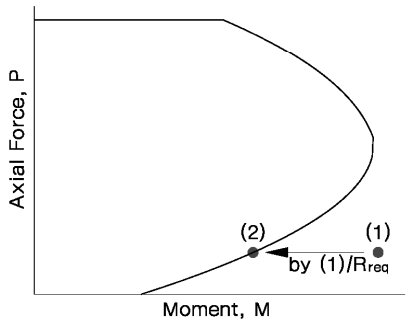
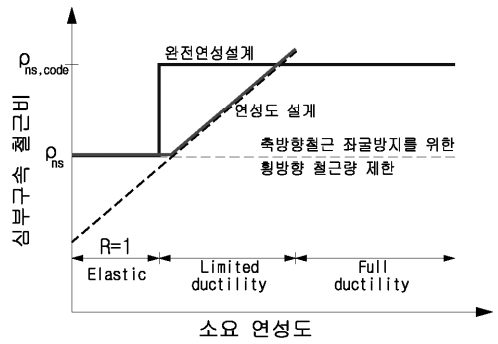




3. 개선내용

연성도 내진설계법 적용 : 2010년 도로교설계기준 부록

3.1 완전연성 내진설계법 및 연성도 내진설계법 비교

<table>
<tr><th>구분</th><th>완전연성 내진설계법</th><th>연성도 내진설계법</th></tr>
<tr><td rowspan="2">기본
개념</td><td>작용지진력이 탄성영역 내에 있으면, 탄성설계를 하고, 작용지진력이 탄성영역을 벗어나면, 작용지진력에 일정한 응답수정계수(R-factor)로 나누고, 그에 따른 횡방향 철근 배근하는 소성설계 개념임
※ 탄성영역 초과 비율에 관계없이 배근</td><td>교각의 소요연성도에 따라 필요한 만큼의 횡구속 철근량을 결정함에 따라 한정연성구간에서 합리적인 양의 횡방향 철근을 배근하는 설계 개념</td></tr>
<tr><td>도로교설계기준(2010) 6.3.4 및 6.8.3</td><td>도로교설계기준(2010) 부록</td></tr>
<tr><td>P-M
상관도</td><td>
</td><td>
</td></tr>
<tr><td>응답
수정계수</td><td>R-Factor(상수)로 적용
예) R=3(단일교각)</td><td>$R_{req} = \frac{M_{el}}{\phi M_n}$ (변수)
M_{el} : 탄성지진 모멘트
ϕM_n : 공칭 휨강도</td></tr>
<tr><td>소요
연성도
-
철근비
관계도</td><td colspan="2">

Elastic : 탄성영역
Limited ductility : 한정연성구간
Full ductility : 완전연성구간</td></tr>
</table>

3.2 연성도 내진설계법 주요 내용

<table>
<tr><th>구분</th><th colspan="2">내 용</th></tr>
<tr><td>적용범위</td><td colspan="2">- 압축강도 50MPa 이하 철근콘크리트 기둥의 내진설계에 적용.</td></tr>
<tr><td>소요연성도</td><td colspan="2">- 기둥의 소성힌지 영역에 필요한 심부구속철근량 산정하기 위한 소요연성도
- 종류 : 소요 곡률연성도, 소요 변위연성도
- 소요 응답계수
$R_{req} = \frac{M_{el}}{\phi M_n}$(변수) M_{el} : 탄성지진 모멘트, ϕM_n : 공칭 휨강도
· R_{req} = 1.0 이하 : 도로교 설계기준(2010) 6.8.3.3의 해당 요구조건을 만족할수 있도록 최소 횡방향 철근 배근
· R_{req} = 1.0 이상 : 소요 변위연성도 및 소요 곡률연성도 산정하여 심부구속 횡방향철근량 산정</td></tr>
<tr><td>심부구속 횡방향 철근량</td><td colspan="2">$A_s = \frac{\rho_s \, s \, d_c}{4}$, $\rho_s = 0.08 \ \alpha\beta \frac{f_{ck}}{f_y} + \ \gamma$
여기서 α, β, γ : 횡방향 철근비 산정을 위한 계수로서 α는 소요연성도에 따라 달라짐</td></tr>
<tr><td rowspan="2">교각 휨강성</td><td>2005 도로교설계기준</td><td>2010 도로교설계기준</td></tr>
<tr><td>강성에 대한 기준 없음
☞ 실무에서는 전단면 강성(EI_g) 적용으로 변위가 지나치게 작게 계산 되므로 작용지진력 크게 산정</td><td>항복 유효강성(EI_y) 적용
☞ 교각 강성에 대한 규정을 추가하여 합리적인 설계 유도</td></tr>
</table>

3.3 설계자문에 따른 세부 적용방안

구 분	적 용 방 안
· 소요 응답수정계수($R_{req} = M_{el} / \phi M_n$)를 결정 시 필요한 탄성지진모멘트 ($M_{el}$)는 P-Δ 효과를 고려하는 지 여부	· P-Δ 효과 고려
· 횡방향철근 최소지름 및 최대간격을 결정할 때 기준이 되는 축방향 다발철근의 지름 적용방법	· 환산지름 사용 : 횡방향철근 직경이 커지면 시공성이 불량하므로, 2단 철근 동시 적용
· 중공단면 교각의 횡방향철근량 산정시 A_g 및 A_c 의 중공면적 포함 여부	· 중공면적 포함 여부에 대한 이론 또는 실험이 없으므로, 향후 중공교각은 탄성설계 적용
· 타원형 또는 사각단면 교각에서 교축방향(소성) 및 교축직각방향(탄성) 내진거동이 상이할 경우, 기둥의 단부구역 결정시 연성도(소성)설계를 수행한 교축방향 단면치수(단변)로 적용하는지 가능한 지 여부	· 교축직각방향은 탄성거동이고, 교축방향이 소성거동일 경우, 교축방향 단면치수(단변)를 단부구역으로 결정 가능

4. 결론

(1) 적용방안

(1.1) 설계 중 노선 : 본 방침 적용

(1.2) 공사 중 노선 : 신설 또는 변경 교량에 대하여 적용

(2) 기대효과 : 심부구속 철근량 약 50% 이상 절감

5. 기타

5.1 연성도 내진설계 예제 (T형 교각)

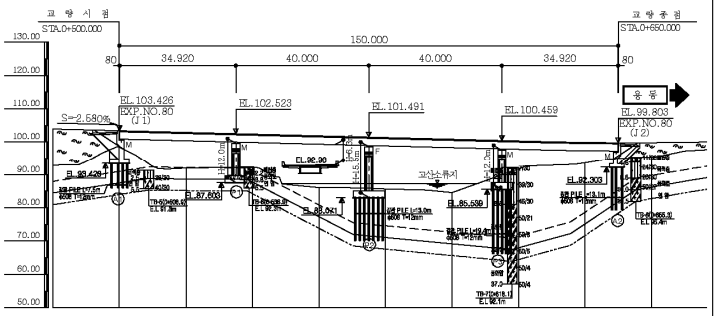
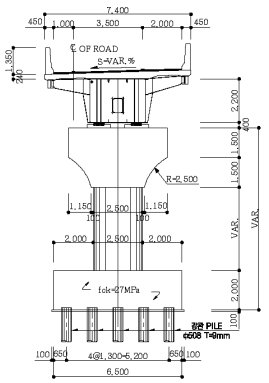
T형 RC교각 (기존설계 : 소성설계 → 연성도 설계 : 한정연성구간)

5.1.1 개요

연성도 내진설계 절차는 기존의 내진설계 절차와 기본적으로 동일하다. 다만, 상수의 응답수정계수를 적용하는것과는 달리 소요연성도를 고려하여 연성요구량에 따라 심부구속철근을 배근하는 방법이므로 소요연성도를 결정하기 위한 과정이 추가되며, 소요연성도를 고려한 새로운 심부구속 철근량 산정식을 적용하는 것이 가장 큰 차이점이라 할수 있다.

따라서, 본 예제에서는 소요연성도를 산정하고 이에 따른 심부구속 횡방향 철근에 대하여 설계한다.

5.1.2 설계대상교량

교량명	ㅇㅇㅇ교		
			
교량형식	강합성 박스거더교	폭원	7.400m
경간구성	L=35.000+2@40.000+35.000=150.000m	평면선형 (사각)	R=500m (직교)
종단선형	(-)2.580%	기초형식	직접기초, 말뚝기초
설계기준	도로교설계기준	설계하중	DB-24, DL-24
내진등급	내진 1 등급 (지진구역 Ⅰ)	지반종류	지반종류 : Ⅱ , S = 1.2
가속도계수	A = 0.11 x 0.14 = 0.154	받침종류	포트받침
교각 일반 사항	・ 소성설계된 교각(P2) 기준 ・ 형상 : T형 교각 (원형) ・ 형상비 : 5.4 (단면직경, D=2.5m, 교각 높이, H=13.5m) ・ 콘크리트 압축강도 : 27 MPa ・ 철근 항복강도 : 400 MPa ・ 축방향철근비 : 1.125 %		
지진저항 시스템	일점고정 지진저항 시스템(포트받침) / 소성설계 교각(P2)에 대한 연성도 설계 검토		

5.1.3 상시 기둥설계 결과

상시 하중 조합에 의한 대상교각(P2) 기둥의 설계결과 H25-57EA(1단) + H25-52EA(2단)의 축방향 철근을 배근함. 이때 기둥 축방향 철근비 $\rho = \rho_l = 0.01125$

5.1.4 지진해석

교량의 구조형식과 지진저항시스템으로 인하여, [하중경우 1]을 교축방향 100%, 교축직각방향 30%로 하고, [하중경우 2]를 교축방향 30%, 교축직각방향 100%로 하여, 다음의 교각 강성을 이용한 지진해석을 수행함.

5.1.4.1 각 교각별 항복강성 산정

지진해석을 수행하기 위하여 각 교각별 지진하중 조합시의 축력(고정하중)을 이용하여 항복유효 단면 2차모멘트를 산정한다.

(1) 고정하중에 대한 축력 산정

(2) 각 교각별 축력비 산정

(2.1) $\frac{P_u}{f_{ck}A_y}$

(3) 각 교각별 항복유효 단면 2차모멘트 산정 [도로교설계기준(2010) 6.8.2.2(2)]

교각단면에 대한 비선형해석을 수행하지 않고, 다음과 같이 항복유효 단면 2차모멘트를 근사식으로 구한 후, 콘크리트의 탄성계수와 함께 교각의 항복강성으로 입력하여 지진해석을 수행한다.

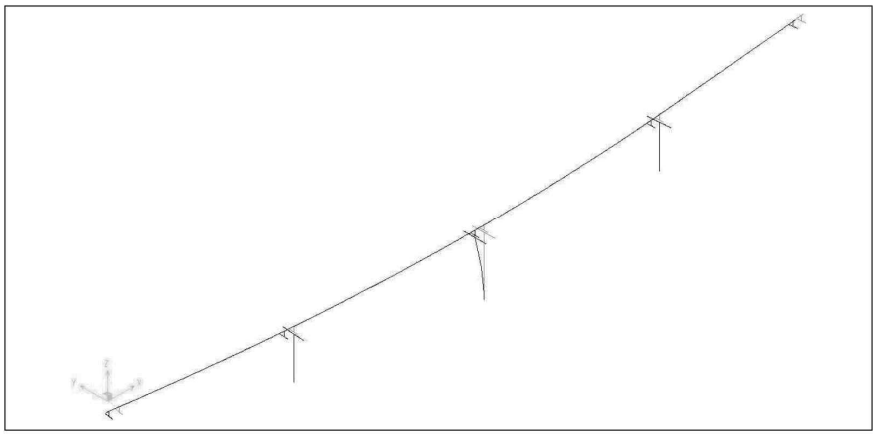
(3.1) $I_{y,eff} = \left(0.16 + 12\rho_l + 0.3\sqrt{\frac{P_u}{f_{ck}A_g}}\right)I_g$

(3.2) 항복유효 단면2차 모멘트 산정

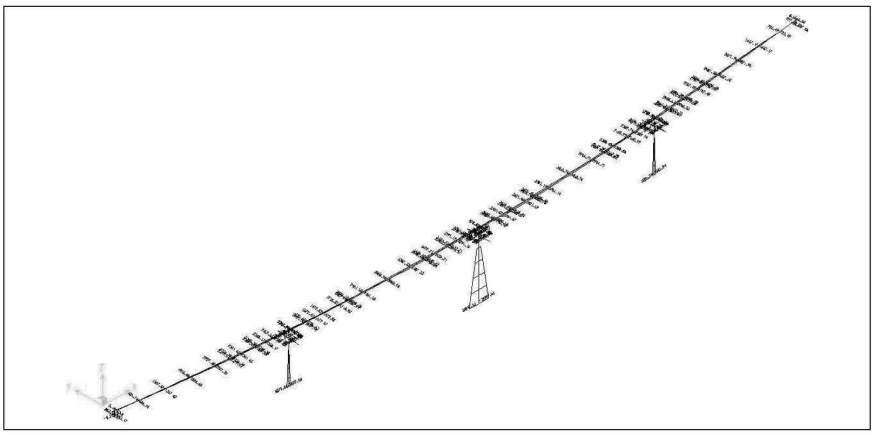
교각	계수축력, P_u (kN)	축방향 철근비, ρ_l	축력비, $\frac{P_u}{f_{ck}A_g}$	항복유효 단면2차모멘트, $I_{y,eff}$ (m^4)	직경 (m)	교각 형태
P1	6668.79	0.01125	0.050317	0.694691	2.5	T형(원형)
P2	6631.69	0.01125	0.050037	0.694331	2.5	T형(원형)
P3	6654.45	0.01125	0.050209	0.694552	2.5	T형(원형)

5.1.4.2 지진해석 결과(교축방향)

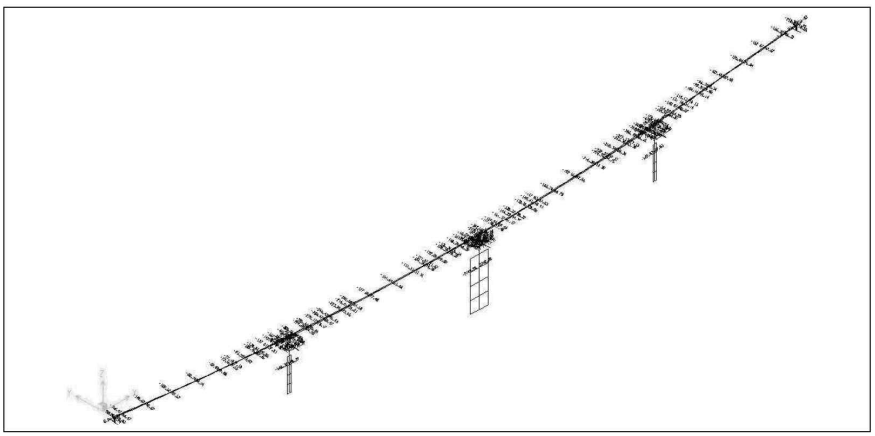
(1) Mode 1 (T : 1.7164sec)



(2) 탄성지진 모멘트 (M = 35165.12kN · m)

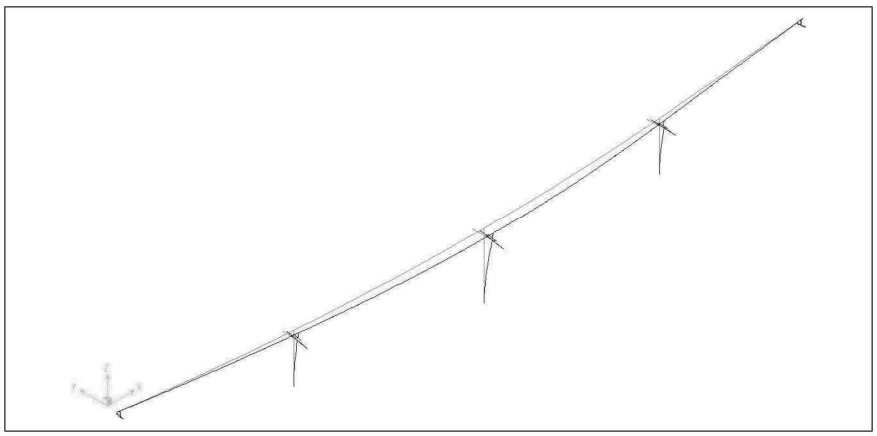


(3) 탄성지진 전단력 (V = 2758.05kN)

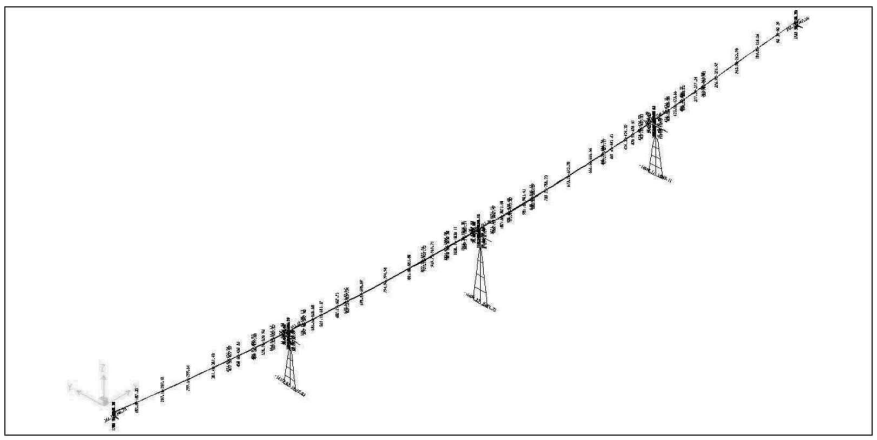


5.1.4.3 지진해석 결과(교축 직각방향)

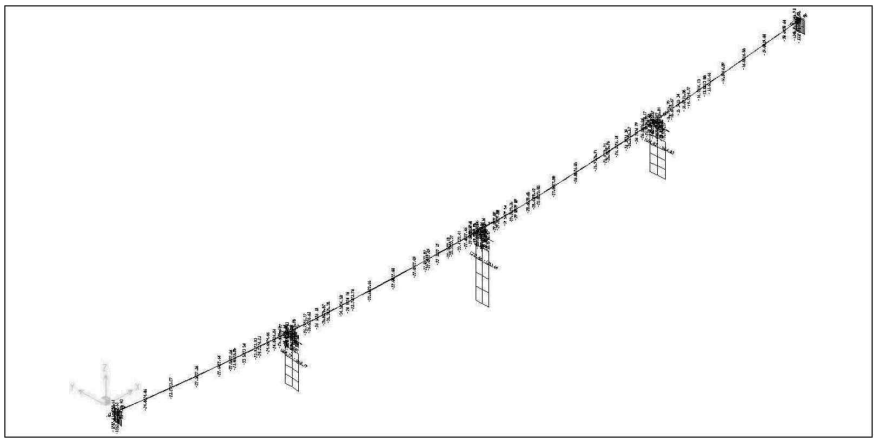
(1) Mode 2 (T : 0.7742sec)



(2) 탄성지진 모멘트 (M = 15624.23kN · m)



(3) 탄성지진 전단력 (V = 1333.46kN)



(4) 지진해석에 대한 결과정리(P2)

Load Case	하중경우1 (SPEC1)	하중경우2 (SPEC2)	비 고
1차 모멘트 (M_{e1})	35165.12 kN · m	15624.23 kN · m	
횡방향 최대상대변위 (Δ)	0.11242 m	0.04853 m	
축 력 (P)	4237.34 kN	4237.34 kN	상부반력
2차 모멘트 (M_{e2})	714.54 kN · m	308.46 kN · m	1.5Δ · P
총모멘트 (M_{el})	35879.66 kN · m	15932.69 kN · m	
탄성지진전단력 (V_{el})	2758.05 kN	1333.46 kN	

여기서, 1차 모멘트 (M_{e1}) : 지진해석에 의한 모멘트

2차 모멘트 (M_{e1}) : 횡방향 지진변위와 축력에 의한 모멘트

= 1.5 × 기둥 상·하단 횡방향상대변위(Δ) × 축력(P)

총모멘트 (M_{el}) : 1차 모멘트 + 2차 모멘트

(4.1) 하중경우 1의 총모멘트가 크므로 1의 값을 적용한다.

5.1.5 소요 연성도

[도로교설계기준(2010) 부록 I.2]

(1) 기둥단면의 축력-휨강도 해석(콘크리트의 등가직사각형 응력분포를 이용한 휨강도 해석)을 수행하여 P-M 상관도를 얻고, 축력 P_u= 6631.69 kN에 해당하는 공칭휨강도와 설계휨강도를 구한 후, 소요 연성도를 계산한다.

(1.1) 축력을 고려한 공칭휨강도 : M_n= 25105.01 kN-m

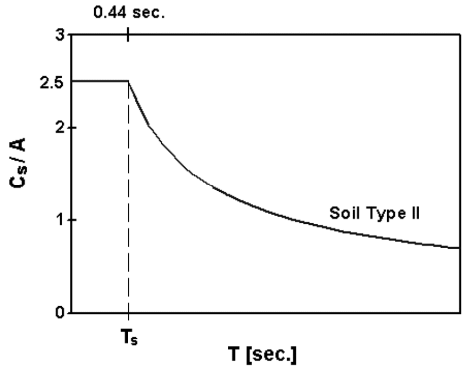
(1.2) 설계휨강도 : ϕM_n= 1.0 (25105.01)= 25105.01 kN-m (강도감소계수 1.0적용)

(1.3) 소요 응답수정계수 : $R_{req} = \frac{M_{el}}{\phi M_n}$ = 35879.66 / 25105.01 = 1.429 > 1.0

따라서, 소요 응답수정계수(R_{req})가 1.0을 초과하므로 소요 연성도를 산정하여 도로교설계기준 부록I.3에서 규정하는 소요 철근량 이상의 횡방향철근으로 구속하여야 한다.

(1.4) 변위연성도-응답수정계수 상관계수 : λ_{DR}

(1.4.1) 지반 종류 Ⅱ(지반 계수 s= 1.2)에 대한 통제주기 T_s= 0.44 초



지반종류	Ts
Ⅰ	0.33초
Ⅱ	0.44초
Ⅲ	0.61초
Ⅳ	0.94초

(2) 교량의 주축방향 1차 모드 주기 T가 통제주기 Ts의 1.25배보다 작은 경우에는 변위연성도-응답수정계수 상관계수 λ_{DR}을 다음 식으로 결정하며, 그 외에는 1.0으로 한다.

(2.1) λ_{DR}= $\left(1-\frac{1}{R_{req}}\right)\frac{1.25\,T_s}{T}+\frac{1}{R_{req}}$

(2.2) $1.25\,T_s$= 1.25(0.44)= 0.55 초 < 주기 T= 1.7164 sec

따라서 λ_{DR}= 1.0 적용

(2.3) 소요 변위연성도 : $\mu_\Delta = \lambda_{DR} \cdot R_{req}$ = 1.0 × 1.429 = 1.429

(2.4) 소요 곡률연성도

(2.4.1) 캔틸레버로 거동하므로, h = D 이고 L_s = L, 따라서, $\frac{h}{L_s}$= $\frac{D}{L}$= $\frac{2.5}{13.5}$= 0.185

$$\mu_\phi = \frac{\mu_\Delta - 0.5\left\{0.7 + 0.75\left(\frac{h}{L_s}\right)\right\}}{0.13\left(1.1 + \frac{h}{L_s}\right)} = \frac{1.429 - 0.5\{0.7 + 0.75(0.185)\}}{0.13\,(1.1 + 0.185)} = \quad 6.044$$

5.1.6 심부구속 횡방향 철근 설계

[도로교설계기준(2010) 부록 I.3]

소요 곡률연성도에 따른 소요 심부구속 횡방향 철근량을 결정하고 설계를 수행한다.

(1) 소요 심부구속 횡방향 철근비를 계산하기 위한 기본 계산 :

(1.1) α = $3(\mu_\phi + 1)\frac{P_u}{f_{ck}A_g} + 0.8\mu_\phi - 3.5$ = 3(6.044+1)(0.0500)+0.8(6.044)-3.5 = 2.392

(1.2) β = $\frac{f_y}{350}$-0.12=$\frac{400}{350}$-0.12=1.023

(1.3) γ = 0.1(ρ_l-0.01) = 0.1(0.01125-0.01)=0.000125

(1.3.1) (note) 축방향 철근비 ρ = ρ_l= 0.01125

(2) 일반구간의 전단철근과 동일한 직경의 횡방향 나선철근으로 H16을 사용한다고 가정하면, d_{bt}= 15.9 mm, A_{sp} = 198.6 ㎟

(나선철근의 지름 15.9 mm는 축방향철근지름의 2/5배 이상이므로 사용할 수 있다.)

(3) 축방향철근이 H25이므로, d_{bl}= 25.4 mm

피복두께를 고려하여 콘크리트 표면에서 축방향철근 중심까지를 125 mm로 하면, 나선철근 외측표면을 기준으로 한 콘크리트 심부의 단면 치수 d_s :

(3.1) d_s= D- $2\left(125 - \frac{d_{bl}}{2} - d_{bt}\right)$= 2500- 2(125- $\frac{25.4}{2}$- 15.9)= 2307 mm

(4) 소요 심부구속 나선철근비 :

(4.1) ρ_s= $0.008\,\alpha\,\beta\,\frac{f_{ck}}{f_{yh}} + \gamma$ =0.008(2.392)(1.023)$\frac{27}{400}$+0.000125 = 0.001446

(5) 심부구속 나선 철근의 간격 :

(5.1) s = $\frac{4A_{sp}}{d_s p_s}$ = $\frac{4(198.6)}{2307(0.001446)}$ =238 mm > 최대 허용 간격, $6d_{bl}$ = 6×25.4 = 152.4mm

따라서, H16@150 사용.

5.1.7 기둥의 최대 소성 힌지력 산정

[도로교설계기준(2010) 6.8.2.5]

연성파괴메커니즘을 확보하기 위한 설계 및 검토로서, 도로교설계기준 6.8.2.5에 따라 지진저항 교각의 최대 소성힌지력을 구하고 최대 소성힌지력과 탄성지진 전단력 중 작은 값을 사용하여 기둥의 전단설계와 받침 및 기초 설계를 수행한다.

(1) 기둥의 휨 초과강도계수

(1.1) 콘크리트 설계기준압축강도가 60MPa 이하이고, 계수 축하중이 $0.3f_{ck}A_g$ 이하 (축력비 0.3 이하)이며,

(1.2) 축방향철근비가 0.03 이하인 교각의 경우,

(1.2.1) 휨 초과강도계수 λ_o=1.25 + 0.05R = 1.25 + 0.05 × 1.429 = 1.321

(여기서, R은 설계에 사용한 응답수정계수이다.)

(2) 기둥의 휨 초과강도

(2.1) M_{po} = $\lambda_o M_n$ = 1.321 × 25105.01 = 33163.72 kN · m

(3) 기둥의 최대 소성힌지력 :

(3.1) V_{po}= $\frac{M_{po}}{L}$= $\frac{33163.72}{13.5}$ = 2456.57 kN

(4) 탄성지진 전단력 : 2758.05 kN

따라서, 최대 소성힌지력과 탄성지진 전단력 중 작은 값인 2456.57 kN을 사용하여 기둥의 전단설계와 받침 및 기초 설계를 수행한다.

5.1.8 기둥의 전단강도 검토

[도로교설계기준(2010) 부록I.4]

(1) 기둥의 설계전단력 : V_u=min[V_{el}, V_{po}]= 2456.57 kN

(2) 콘크리트에 의한 전단강도 :

(2.1) k= 0.3-0.1(μ_Δ-2) : μ_Δ > 2.0인 경우

(2.2) k= 0.3 : μ_Δ ≤ 2.0인 경우 [도.설.기(2010) 부록I.4(4)]

(2.3) 변위연성도 μ_Δ= 1.429 < 2.0 이므로 ∴ k= 0.3

(2.4) 원형단면이므로, A_e= 0.8 A_g= $0.8\frac{\pi(2500)^2}{4}$ = 3926990.8㎟

(2.5) V_c=$k\sqrt{f_{ck}}A_e$= $0.3\frac{\sqrt{27}(3926990.8)}{1000}$= 6121.57 kN

(3) 전단철근에 의한 전단강도

(3.1) 나선철근 수직간격 s= 150 mm

(3.2) 나선철근 중심 간의 심부콘크리트 지름,

(3.2.1) D_c=D-2$\left(125-\frac{d_{bl}}{2}-\frac{d_{bt}}{2}\right)$= 2500- 2$\left(125-\frac{25.4}{2}-\frac{15.9}{2}\right)$= 2291.3 mm

(3.3) V_s = $\frac{\pi}{2}\frac{A_{sp}f_{yh}D_c}{s}$= $\frac{\pi}{2}\frac{198.6(400)(2291.3)}{150(1000)}$= 1906.118 kN

(4) 축력작용에 의한 전단강도= :

(4.1) P_u= 6631.69 kN, h= D= 2500 mm, L_s= L= 13500 mm

(4.2) V_p= $0.15\frac{P_u h}{L_s}$= $0.15\frac{6631.69(2500)}{(13500)}$= 184.21 kN

(5) 기둥의 공칭전단강도, 설계전단강도 및 강도검토 :

(5.1) 공칭강도 : V_n= V_c+ V_s+ V_p= 6121.57 + 1906.12 + 184.21 = 8211.90 kN

(5.2) 설계강도 : ϕV_n= 1.0 × 8211.90 = 8211.90 kN

(5.3) 강도검토 : ϕV_n= 8211.90 kN > V_u = 2456.57 kN ∴ O.K

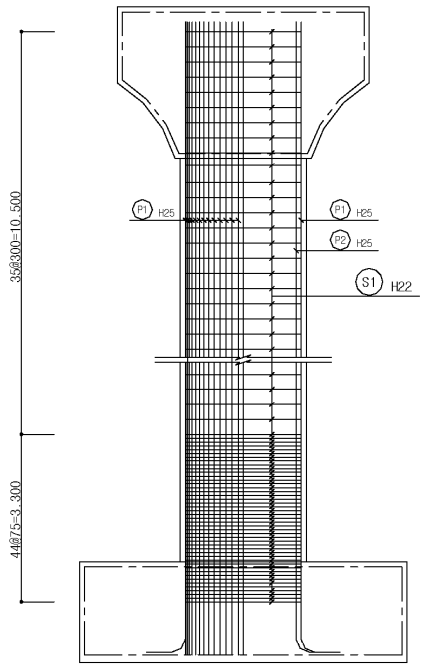
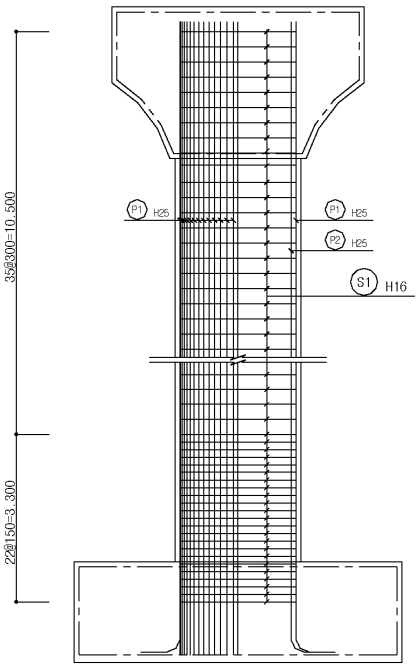
5.1.9 받침 설계

연성파괴메커니즘을 확보하기 위하여 고정단 교각 받침의 총 수평하중 설계강도가 2456.57 kN 이상이 되도록 설계한다.

5.1.10 기초 설계

연성파괴메커니즘을 확보하기 위하여 기초의 수평하중 설계강도가 2456.57 kN 이상이되도록 설계한다.

5.1.11 기존 설계(2005년기준)와 연성도 내진설계에 의한 횡방향 철근 배근 비교

구 분	기존 설계(2005년 기준)	연성도 내진설계
배근도		
설계법	소성설계 (R=3)	연성도 내진설계 (R=1.464)
횡방향 철근 간격	1) 소성힌지 구역 H22@75 간격으로 배치 2) 단부구역 이외의 구역 H22@300 간격으로 배치	1) 소성힌지 구역 H16@150 간격으로 배치 2) 단부구역 이외의 구역 H16@300 간격으로 배치
횡방향 철근량	1) 개 수 : H22 x 80ea 2) 총길이 : 654.940 m 2) 철근량 : 1.991 ton 커플러 : 91 ea	1) 개 수 : H16 x 58ea 2) 총길이 : 492.734m 2) 철근량 : 0.769 ton 커플러 : 64 ea