국내 기존교량에 대한 내진성능 평가방법

최혁주 | 토목기술부 | 02) 3433-7763 | E - mail: hush-hush@ssyenc.co.kr

1. 배경

지진에 대하여 비교적 안전지대로 생각됐던 우리나라도 1978년 10월 7일 홍성지진, 그뒤 1982년 2월 14일에 발생한 사리원 지진, 1996년의 진도 약 4.0 이상의 경주, 영월지진 등 연이은 중·소규모의 지진발생으로 한반도도 지진에 대하여 안전한 지역이아니라는인식이 일어나고 있다. 하지만 국가전반에걸쳐중요한 관심사로대두되고 있는 교량의내진설계역사는그리길지않다.

내진설계의 역사가 가장 오래된 것으로 알려진 일본의경우에도 1964년이후에교량의 내진설계개념을도입한후 1971년이되어서야본격적인 교량내진설계가 이루어졌다고 할 수 있다. 미국의 경우는 1971년 San Fernando 지진이후, 교량내진설계에 대한 필요성이 제기됨과 함께 활발한 연구수행 결과로써 1983년이 되어서야 비로소 최초의 교량내진설계기준이제정되었다. 이에 영향을 받아 우리나라에서는 1992년 개정된 도로교표준시방서에 처음으로 내진설계편이 도입되었으며, 그후 국내산업기반 시설에 대한 보다 높은 신뢰성을 가진 내진설계기준의 제정작업에착수하여 1997년말교량에대한내진설계기준이 새로이 제정, 발표되었고, 2000년 도로교설계기준 에서는이내용을일부반영한새로운내진설계요건을추가하였다.

그러나 내진설계기법이 도입된 1992년 이전에 설계, 시공된모든교량과그이후라도내진설계대상에서제외된구조물은 모두지진에대한아무런대비책이없다고해도과언이아니다. 따라서지진의발생시 그 안전성이 의문시되며 구조물에 따라서는 여러 종류의피해가예상된다. 또한내진성능의 개념이 도입되어설계, 시공된구조물이라 하더라도 어느 정도의 내진성능을 가지고 있는지 의문이며, 우리나라의 내진설계기준은 과연 우리나라의 지진특성에 적합하게 제정되었는가도의문사항중하나이다.

현재 국내에서는 15,000여 개의 각종교량이 있지만, 1992년이전에건설된절대다수의교량이지진에 대한고려없이설계, 건설된교량이다. 물론내진설계가되지않은교량도어느정도의내진성능을갖고있기는하지만, 이들교량에대한체계적인내진성능평가및보강은필수적인작업이다.

지진발생 빈도가 높고 피해사례가 빈번한 선진 외국에서는 피해구조물은 물론 기존구조물에 대한 내진 보수·보강공법이 체계적으로 연구·정립되어있고, 기존구조물에대한내진성능을진단하고평가, 판정하는 기법이 나름대로 확립되어 있어 지진피해를 최소화하고 있다. 이에 비해국내에서는 현재 한국지진공학회에서 건설교통부의 위임을 받아 내진성능평가메뉴얼을작성하고있으며, 향후메뉴얼의수정및 보완과정을거쳐실무에적용시킬것으로예상된다.

따라서 본 고에서는 국내의 교량구조물 중 철근콘크리트 교각의 내진성능 평가메뉴얼의 기본개념에 대하여 한국지진공학회의 기술강습회에서 소개된내용중에서일부를발췌하여간략히소개하고자한다.

2. 기존교량에 대한 내진성능 평가방법

2.1 개요

내진성능평가 메뉴얼에서의 내진성능 평가는 교량을 구성하는 부재별로 부재가 보유하고 있는 공급역량과 평가기준 지진시 각 부재에 요구되는 소요역량을비교함으로써수행된다.

평가의효율성을고려하여우선내진성능예비평가를수행하고, 그결과에따라내진성능상세평가를수행하도록 하고있다. 예비평가에서는 설계도서 및 현장조사등을 통해 입수한 정보에의거하여교량의내진성능을그룹화하여상세평가를위한우선순위를결정하게된다.

내진성능예비평가수행
↓
내진성능상세평가수행
↓
평가결과에따른보수·보강방안선정

2.2 내진성능평가를위한평가기준지진의선정

기존교량의내진성능을평가하기위한평가기준지진은 현행 도로교 설계기준에 의한 설계지진과 구조물의잔존수명을고려하여도로교설계기준의설계지진의지진세기를줄여서사용하는지진을선택적으로 사용할수있다.

잔존수명을고려하는경우, 잔존수명/ 설계수명비에 따른가속도계수(A)를계산하면[표1, 표2]와같다.

[표1] 내진성능평가기준지진가속도계수(A) [지진구역Ⅰ]

내진등급	잔존수명/ 설계수명		
	1/2 이상	1/2~1/4	1/4 이하
1등급	0.15g	0.11g	0.08g
2등급	0.11g	0.08g	0.07g

[표2] 내진성능평가기준지진가속도계수(A) [지진구역Ⅱ]

내진등급	잔존수명/ 설계수명		
	1/2 이상	1/2~1/4	1/4 이하
1등급	0.11g	0.07g	0.05g
2등급	0.07g	0.05g	0.04g

2.3 내진성능에대한예비평가수행

기존교량을 지진도, 취약도, 영향도를 고려하여 내진그룹화 하고, 우선순위가 높은 그룹에 속하는 교량에대하여우선적으로내진성능예비평가를수행한다.

1) 지진도 : 지진구역과 지반종류, 도시권역을 고려하여[표3]과같이4개그룹으로분류한다.

[표3] 지진도등급기준

지진구역	구분	지반종류			
		Ⅳ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅰ
Ⅰ	도 시	1그룹		2그룹	
	기타지역		2그룹	3그룹	
Ⅱ	도 시				4그룹
	기타지역	2그룹	3그룹	4그룹	

2) 취약도 : 지진으로 인해 교량이 붕괴되거나 손상입기 쉬운 형태를 구분하는것으로 취약도 지수(Vulnerability Index)로나타낸다.

$$VI = 0.2\left(\frac{CONT}{3}\right) + 0.15\left(\frac{LENGTH}{100}\right)^{0.1} \cdot \left(\frac{WIDTH}{WIDTH_{CR}}\right)^{0.3}$$
$$+ 0.05\left(\frac{AGE_{PR}}{AGE_{CR}}\right) + 0.2\left(PIER_{INDEX}\right) + 0.2\left(PIER_{INDEX}\right)$$
$$+ 0.1\left(EARTH_{INDEX}\right)\left(PILE_{INDEX}\right) + 0.1\left(LIQ_{INDEX}\right)$$
$$+ 0.05\left(DETIOR_{INDEX}\right) + 0.1\sqrt{\sum_{support\ No.}\left(1 - \frac{SUPPORT_{LENGTH}}{SUPPORT_{CR}}\right)^2}$$

CONT : 최대연속경간수

LENGTH : 최대연속경간장(m)

WIDTH : 교량총폭원(m)

$WIDTH_{CR}$: 교량폭원기준(m)

AGE_{PR} : 현재교량수명(년)

AGE_{CR} : 교량형식에따른경제적수명기준
(강교량: 50년, 콘크리트교량: 40년)

$PIER_{INDEX}$: 교각의형태에따른지수
(단주교각: 1.0, 캔틸레버교각: 0.8, 다주교각: 0.6)

EARTH$_{INDEX}$: 토압영향가능유무
(영향높은경우: 1, 영향이없는경우: 0.1)
PILE$_{INDEX}$: 지반구조물상호작용및기초위험유무
(영향이높은경우: 1, 영향이없는경우: 0.1)
LIQ$_{INDEX}$: 액상화가능여부
(가능성 높은경우: 1.0, 가능한 경우: 0.7, 가능성 낮은 경우: 0.4, 가능성없는경우: 0)
DETIOR$_{INDEX}$: 교량의노후화등급지수
(A등급: 0.1, B등급: 0.2, C등급: 0.7, E등급: 1.0)
SUPPORT$_{LENGTH}$: 지점당교량받침지지길이(㎜)
SUPPORT$_{CR}$: 도로교설계기준에의한받침지지길이(㎜)
SKEW$_{INDEX}$: 교량의받침선과교축직각방향의사잇각에의한영향지수
(사잇각 45°이상: 1.0, 30~45°: 0.5, 30°미만: 0)

3) 교량의영향도: **지진으로인해피해가발생할경우이로인한사회및 경제적인영향을고려하는결정인자이며영향도지수(Impact Coefficient)로나타낸다.**

$$IC = 0.3\log\left(1+\frac{ADT}{5000}\right) + 0.35(LEVEL) + (CATEGORY)Y + 0.15(UTILITY)Y + 0.10(FACILITY)Y + 0.10\left(\frac{DETOUR}{50}\right)^{.25}$$

ADT : 일평균교통량(대)
LEVEL : 교량설계등급
(1등교(DB24): 1.0, 등교(DB18): 0.8, 3등교(DB13.5): 0.6)
CATEGORY : 시설물종별
(1종시설물(특수교량): 1.0, 1종시설물(특수교량제외): 0.8, 2종시설물: 0.6)
UTILITY : 교량하부를통과하는기간망
(철도: 1.0, 도로: 0.9, 수로: 0.8, 없는경우: 0)
FACILITY : 중요시설물부착여부
(가스 및 송유관: 1.0, 상수도관 및 광통신 케이블: 0.8, 기타시설물: 0.5, 시설물없는경우: 0)
DETOUR : 교량통행이차단되었을때우회로길이(㎞)

기존교량의 내진등급은교량의 지진도, 취약도, 영향도를 동시에 고려하여 다음과 같이 4개 등급으로 분류한다.

①내진보강핵심교량
②내진보강중요교량
③내진보강관찰교량
④내진보강유보교량

2.3 내진성능에대한상세평가수행

1) 지진하중의산정

교각에작용하는지진하중은교각의단면강도와내진성능평가기준지진에의한교각에작용하는탄성지진력중작은것으로한다.

(1) 교각의 단면강도

교각의 단면강도는 휨강도와 전단강도를 고려하여 결정하고전단강도는변위소성에따른강도감소를고려한다.

①교각의휨강도

$P_{yi} = M_{yi} / H_e$ [초기항복시]
$P_n = M_n / H_e$ [극한시]

M_{yi} : 초기항복시항복휨강도
M_n : 극한시공칩휨강도
H_e : 교축직각방향에대해상부구조의관성력작용위치까지의높이교축방향에대해교각의높이로한다.

②철근콘크리트교각의전단강도(V_n)

$$V_n = V_c + V_s + V_p$$

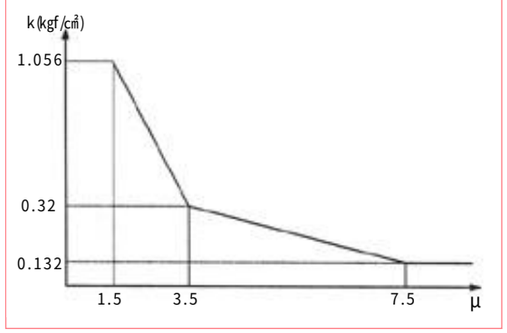
V_c : 콘크리트가부담하는전단강도

$$V_c = k\sqrt{f_{ck}}\,A_c$$

k : 부재의 소성변위도($\mu = \Delta/\Delta u$)에 따라 콘크리트의 전단강도를감소시켜주는계수
A_e : 유효단면적[$0.8A_{gross}(cm^2)$]

여기서, 변위소성도에 따른 전단강도 감소계수와의관계는[그림 1]과같다.

[그림1] 변위소성도에따른콘크리트전단강도



V_s : 전단철근이부담하는전단강도

$$V_s = \frac{\pi}{2}\cdot\frac{A_h f_y D}{s}\cot\theta \quad \text{(원형교각)}$$

$$V_s = \frac{A_h f_y D}{s}\cot\theta \quad \text{(구형교각)}$$

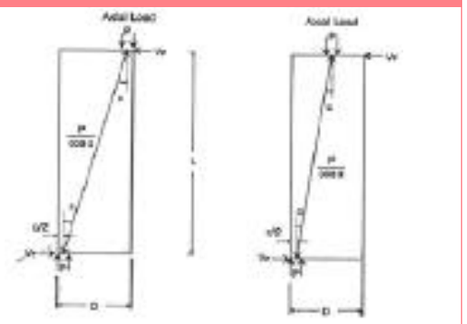
A_h : 원형철근1본의단면적(cm^2)
A_v : 전단력작용방향으로있는1층의횡방향철근의전단면적(cm^2)
f_y : 횡방향철근의항복강도(kgf/cm^2)
D : 횡방향철근으로구속된심부콘크리트의크기, 원형단면및구형단면에서횡철근중심사이의거리(cm)
S : 스터럽또는띠철근의간격(cm)
θ: 부재축과전단균열이이루는각도

V_p : 축력에의한전단저항력

$$V_p = P\cdot\tan\alpha$$

P : 기둥에작용하는축하중
α: 기둥중심축과압축스트럿이이루는각도
(* 이중곡률을 갖는 변형의 경우와 단일곡률을 갖는 변형의경우에대하여각각정의됨. [그림2 참조])

[그림2] 축력에의한전단강도



(a) Reversed Bending (b) Single Bending

③교각의변위계산

$$\Delta_y = \frac{\phi_y H^2}{3} \quad \text{[항복변위]}$$

$$\Delta_p = \theta_p\left(H - \frac{L_p}{2}\right) \quad \text{[소성변위]}$$

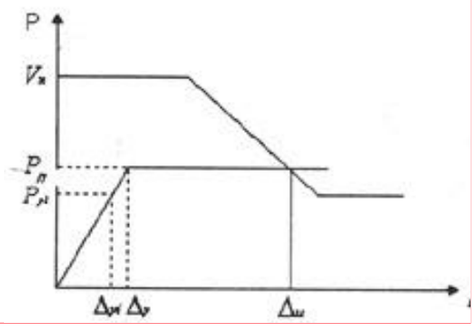
$$\Delta_u = \Delta_y + \Delta_p \quad \text{[극한변위]}$$

θ_p : 소성회전각
$\theta_p = (\Phi_u - \Phi_y)L_p$
L_p : 소성힌지부의등가길이
$L_p = 0.08H + 0.022 f_y d_{bl} \geq 0.044 f_y d_{bl}$

H: 교각높이
Φ_u : 극한시곡률(cm^{-1})
Φ_y : 항복시곡률(cm^{-1})
f_y : 주철근항복강도(kgf/cm^2)
d_{bl} : 주철근직경(cm)

교각의휨 및 전단강도, 수평변위가결정되면휨에 의한 강도-수평변위의 관계를 Bilinear모델로 이상화하고 전단강도-변위소성도의 관계를 함께 도시하여 교각의 단면강도(P_n) 및 변형성능을 교축 및 교축직각방향에대하여각각결정한다.

[그림3] 교각의단면강도및변위연성도의결정



(2) 탄성지진력

내진성능 상세평가시 교각에 작용하는 탄성지진력은교량의탄성주기를계산하여내진성능평가기준에 대한 응답스펙트럼으로부터 응답가속도(탄성지진응답계수 C_s)의 크기를 결정하여 계산한다. 이 때 교각의 탄성상태는 균열 발생후 인장측 최연단 주철근이 처음으로항복하는초기항복상태로정의한다.

(3) 지진하중의 결정

지진하중은 교축 및 교축직각방향의 탄성지진력(P_E)과단면강도(P_n)를비교하여작은것으로한다.

$P_{EQ}^L = Min[\ P_n^L\ ,\ P_E^L\ ]$ 교축방향

$P_{EQ}^T = Min[\ P_n^T\ ,\ P_E^T\ ]$ 교축직각방향

P_{EQ}^L : 교축방향지진하중

P_{EQ}^T : 교축직각방향지진하중

P_n^L : 교축방향단면강도

P_n^T : 교축직각방향단면강도

P_E^L : 교축방향탄성지진력

P_E^T : 교축직각방향의탄성지진력

2) 교각의내진성능평가수행

신설구조물의내진설계개념을살펴보면교각의설계지진하중은 탄성거동시 설계지진에 의하여 교각에 작용하는 지진하중, 즉 탄성지진력을 구조물의 형식에의하여규정되는응답수정계수(R)로나눈값이다. 따라서, 교각의비선형변형을허용하게되고이에따라충분한변위연성도를확보하여지진에너지를흡수할수있도록하는내진상세를규정하고있다.

만약, 기존 교각이어느 정도의 변위연성도를 허용하고 있다면 이러한 변위연성도의 크기를 반영하여 교각이 현재 보유하고 있는 단면강도를 등가의 탄성강도로 변환할 수 있다. 비교적장주기의구조물에서는 변위연성도(μ)와 응답수정계수(R)에는 변위일정법칙(Equal Displacement)에 의하여 $R = \mu$와 같은 관계가 있으며, 비교적 단주기구조물인 경우에는 에너지 일정법칙(Equal Energy)에$R = \sqrt{2\mu - 1}$과 같은 관계가있다.

(1) 탄성지진력의 비교에 의한 내진성능 평가방법

교각이 현재보유하고있는 변위연성도 즉, 공급변위연성도(μ)의 크기를 안다면 이에 상응하는 응답수정계수(R로 정의)의 크기를 계산할 수 있으며, 교각의 등가탄성강도($[P_n]_{Eqv}$)는 단면강도에 응답수정계수(R')를곱하여구할수있다.

$[\ P_n^L\ ]_{Eqv} = P_n^L \times R^{\prime\prime}$ 교축방향

$[\ P_n^T\ ]_{Eqv} = P_n^T \times R^{\prime\prime}$ 교축직각방향

$[P_n]_{Eqv}$는 변위연성도를 고려한 교각의 등가탄성강도, P_n는 교각의 단면강도, R 은 공급변위연성도의 크기에 상응하는 응답수정계수의 크기이며, 윗첨자 L과T는각각교축방향, 교축직각방향을나타낸다.

따라서교축방향및교축직각방향에대하여교각이 보유하고 있는 등가탄성강도를 조합탄성지진력과 비교하여내진성능을평가할수있다.

$[P_n^L]_{Eqv} \geq [P_E^L]_{comb}$ and $[P_n^T]_{Eqv} \geq [P_E^T]_{comb}$ 만족

$[P_n^L]_{Eqv}$ $[P_E^L]_{comb}$ or $[P_n^T]_{Eqv}$ $[P_E^T]_{comb}$ 불만족

여기서, $[P_E^L]_{comb}$, $[P_E^T]_{comb}$는 각각 교축 및 교축직각방향의 조합탄성지진력으로 교축 및 교축직각방향의탄성지진력에대하여다음과같이30% Rule을사용하여조합한값이다.

$$[P_E^L]_{comb} = \sqrt{(P_E^L)^2 + (0.3 \times P_E^T)^2}$$

$$[P_E^T]_{comb} = \sqrt{(0.3 \times P_E^L)^2 + (P_E^T)^2}$$

(2) R-Factor 비교에 의한 내진성능 평가방법

교각의교축및교축직각방향에대하여공급응답수정계수(R_y)와 소요응답수정계수(R_d)를 비교하여 교각의내진성능을평가하는방법으로교각의공급응답수정계수(R_y)는 설계지진에 대한 조합탄성 지진력과 교각의 단면강도 비로 계산되며 소요응답수정계수(R_d)의 경우 비교적 장주기 구조물의 경우 $R_d = \mu$ 단주기구조물의경우$R_d = \sqrt{2\mu - 1}$로계산된다.

$R_c^L = [P_E^L]_{comb} / P_n^L$ 교축방향

$R_c^T = [P_E^T]_{comb} / P_n^T$ 교축직각방향

$R_c^L \leq R_d^L$ and $R_c^T \leq R_d^T$ 만족

$R_c^L > R_d^L$ and $R_c^T > R_d^T$ 불만족

3. 결론

내진성능에 있어서 신설교량은 지진발생시 구조물에작용하는하중이적절히분배되도록교량계획시부터구조체계를 합리적으로 계획할 수 있으나, 기존에 건설되어공용중인교량은대규모적인구조물체계의 변경이 어렵기 때문에 기존 구조물을 활용하면서 효과적이고, 현실성 있는내진성능보강방안을 찾는것이중요하다.

이러한 보강방안을 찾기 위해서는 먼저 교량에 대한정밀한내진성능평가를수행하여대상교량의선정 및 우선순위를 결정하고, 내진성능의 정밀평가가 요구되는교량을대상으로교량의사용성손실및 붕괴와관련된위험도를산출하여 이위험도를 근거로내진성능보강, 혹은교체여부를합리적으로결정할수 있다.

따라서 내진성능의 취약한 부분을 확인하고 이에 대한 적절한 보강방안을 선정하기 위하여는 대상 교량의정밀한내진성능평가가선행되어야할것이다.

참고문헌

1. 한국지진공학회, 철근콘크리트교각의내진설계 , 2000. 7
2. 한국도로공사, 고속도로교량의내진설계편람 , 2000
3. 한국지진공학회, 기존교량의내진보강방안연구 , 1999. 7
4. 한국지진공학회, 도로교의내진설계 , 2000
5. 김성균, 전명순, 김우한, 조봉곤, 김준경, 영월지진과최근한반도지진활동 , 1997년도춘계지진공학회학술발표회논문집, Vol.1, pp.1~14
6. 한국건설기술연구원, 내진설계기준연구 , 1996. 9
7. 한국건설기술연구원, 지진피해를받는구조물의보수・보강공법 , 1994
8. ATC 14, Evaluating the Seismic Resistance of Existing Buildings, 1987