

뉴질랜드 기준에서의 제한된 연성의 RC 구조물 내진 상세설계

Seismic Details of Reinforced Concrete Structures of Limited Ductility in New Zealand Standard

이 한 선*
Lee, Han-Seon

유 은 진**
Yoo, Eun-Jin

우 성 우***
Woo, Sung-Woo

ABSTRACT

As the level of earthquake intensity in Korea is considered to be moderate, some structures or structural elements may be subjected to the reduced ductility demand, in contrast to the structures in high seismicity, due to the large inherent strength induced by gravity loads. New Zealand Standard (NZS) deals with these structures within the category of structures of limited ductility.

This paper briefly reviews the applicability of the code, regarding limited ductility, for frame structures which are commonly used as the office building structural system. The difference of the loading condition is considered. Details of the plastic hinge region are compared between NZS and Korean standard.

1. 서 론

우리나라의 내진설계와 관련한 철근콘크리트 상세기준은 미국의 ACI 318-95의 중진지역에 대한 상세기준을 바탕으로 만들어졌다. 미국의 지진기준은 강진(強震)을 위주로 개발되었으므로, 우리나라와 같은 중·약진 지역에 적절한지에 대해서는 좀 더 검토할 필요가 있다.

지진력보다 중력하중 내지 풍하중이 설계에 미치는 영향이 더 큰 구조물의 경우, 구조물은 완전 탄성 응답과 완전 연성 응답 사이의 중간 거동을 보일 거라 예측할 수 있다. 이렇게 구조물이 지진시 완전한 연성이 요구되지 않을 경우, 완전한 연성(full ductility)의 구조물에 비해 소성힌지 영역에 대한 설계기준을 완화할 수 있을 것이다. 뉴질랜드 기준(NZS)의 제한된 연성(limited ductility)에 대한 기준은 이와 같은 구조물의 상세설계의 완화 가능성을 보여준다.

이 논문은 사무소 건물에 일반적으로 이용되는 모멘트 골조(moment frame)에 대해 우리나라 기준과 NZS의 하중 적용 조건 및 상세설계를 비교하여 상세설계와 관련하여 합리적이고 경제적인 설계의 가능성을 살피는 것을 그 목적으로 한다.

* 정회원, 고려대학교 건축공학과 교수

** 정회원, 고려대학교 건축공학과 석사과정

*** 정회원, 고려대학교 건축공학과 박사과정

2. 지진하중의 비교

상세설계의 비교에 앞서 모멘트 골조(moment frame) 구조물에서 NZS와 우리나라 기준의 지진하중을 비교한다. 하중 비교시 다음 두 가지에 대해 주의하여야 한다.

(1) 지진하중에서의 차이

지진하중 고려시 밀면 전단력 V 는 식 (1)과 같다.

$$V = CW_t \quad (1)$$

C 는 구조물의 중요도, 연성, 주기 및 지반 등을 고려한 계수이며 W_t 는 구조물의 총 중량이다. 우리나라의 기준의 W_t 는 구조물의 고정하중(D)만을 고려한 반면, 뉴질랜드 기준(NZS)의 경우 고정하중(G) 외에 적재하중(Q_u) 역시 고려한다.

NZS에서 W_t 에 포함되는 적재하중 Q_u 는 구조물의 용도에 따른 기본 등분포 적재하중에 적용 면적과 구조물의 극한 한계상태를 고려하는 감소계수를 각각 적용하여 구한다.

실제 구조물에서 위와 같이 뉴질랜드의 방식으로 구한 적재하중에서의 차이는 구조물의 전체하중에 대해 무시할 수 있는 작은 값이다(3% 가량). 그러므로, 이 논문에서는 적재하중에 의한 차이는 고려하지 않는다.

(2) 하중 조합의 차이

NZS와 우리나라 기준의 하중 조합을 비교하면 표 1과 같다.

표 1 NZS와 우리나라 기준의 하중 조합 비교

NZS*	우리나라 기준**
1.4G	1.4D + 1.7L
1.2G + 1.6Q	0.9D + 1.4E
G + Q_u + E_u	1.05D + 1.275L + 1.35E
* NZS	G 고정하중 Q 활하중 Q_u 극한한계상태의 활하중 E_u 지진력
** 우리나라 기준	D 고정하중 L 활하중 E 지진력

표 1에서 NZS와 달리 우리나라 내진설계기준에서는 지진하중이 사용성 수준의 하중을 의미하며 강도설계시 1.35배(또는 1.4배)의 계수를 적용한다는 것을 알 수 있다. 그러므로 지진에 의해 발생하는 하중에 대해 NZS의 V 와 우리나라 기준의 1.35 V 를 비교하는 것이 합당하다.

모멘트 골조에서 구조물에 가정된 연성계수를 비교하면, NZS는 완전한 연성(full ductility)의 경우 $\mu = 6$, 제한된 연성(limited ductility)의 경우 $\mu = 3$ 으로 규정하였다. 우리나라 기준⁽⁶⁾의 경우 모멘트 골조에서 $R = 5$ 의 값을 이용한다.

각 기준을 이용하여 구한 밀면전단력을 비교한 후, 제한된 연성에 대한 기준의 적용가능성 여부를 파악하였다. 구조물의 전체 하중 W_t 는 동일하다 가정하고 구조물의 고유주기에 대한 밀면전단력 계수

C 값을 비교하였다.

그림 1은 NZS와 우리나라 기준의 밀면전단력 계수를 비교한 것이다. 가정조건은 다음과 같다.

- ① 모멘트 골조, 사무소 건물
- ② 지반 가속도 0.11g (우리나라 기준값)
- ③ 건축물의 중요도 계수 = 1.0
- ④ 중간정도의 지반

하중조합의 차이를 고려하기 위해 우리나라 기준에서의 밀면전단력 계수에는 1.35를 곱하여 비교하였다.

비교결과 고유주기 $T=1$ 초 이하의 구조물의 경우 우리나라 기준을 이용하여 구한 지진하중은 NZS의 제한된 연성(limited ductility)의 구조물 ($\mu = 3$)과 완전한 연성(full ductility)의 구조물 ($\mu = 6$)의 지진하중의 중간값이란 것을 알 수 있다. $T=1.1$ 초에서 우리나라 기준을 이용한 지진하중이 더 큰 값을 가지게 된다. 이 때의 구조물의 높이는 식 (2)를 이용하여 추정할 수 있다.

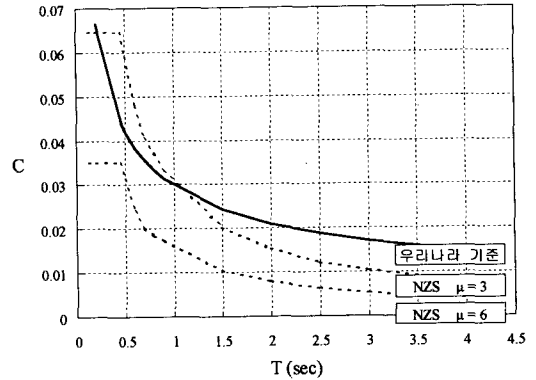


그림 1 NZS와 우리나라 기준의 밀면전단력 계수 C의 비교

$$T = 0.0731(h_n)^{3/4} \quad (2)$$

식 (2)는 NZS와 우리나라 기준 모두에 사용되는 식이다. 이 때 h_n 은 구조물의 전체 높이를 나타낸 다(단위 : m). 이로부터 구조물의 높이 37m 이상(10~12층)에서 우리나라 기준의 지진하중이 NZS의 제한된 연성의 지진하중보다 크다는 것을 의미한다.

3. 상세설계 기준 비교

모멘트 골조 구조물에서의 NZS의 제한된 연성의 구조물과 완전한 연성의 구조물, 그리고 우리나라 내진설계 기준의 상세설계를 비교한다.

우리나라의 콘크리트구조설계기준⁽⁷⁾은 21장에 내진설계에 대한 별도의 규정을 두었으며, 21장에 규정되지 않은 것은 일반항목을 그대로 사용한다. 콘크리트 구조물에 대한 뉴질랜드 기준인 NZS 3101의 경우 각 장마다 내진설계에 대한 별도의 규정이 있으며, 17장에 제한된 연성의 구조물에 대한 규정을 별도로 두었다.

표 2, 표 3은 NZS의 완전한 연성과 제한된 연성, 그리고 우리나라 기준에서의 보와 기둥의 소성힌지 영역의 배근상세에 대한 규정을 각각 비교한 것이다.

표 2, 3에서 다음과 같은 사실을 알 수 있다.

- (1) 보의 스테럽 간격 및 기둥의 띠철근 최대 허용간격의 경우 우리나라의 기준에서 이용하는 값이 NZS의 완전한 연성의 구조물과 제한된 연성의 구조물에 요구되는 간격의 중간 정도이다.

표 2 보의 소성힌지 영역에서의 배근 비교

적용 부분	NZS		우리나라 기준
	완전한 연성의 구조물	제한된 연성의 구조물	
종방향 철근 : 소성힌지 영역의 압축 철근비	$\rho' \geq 0.5\rho$	$\rho' \geq \frac{3}{8}\rho$	정모멘트 강도는 부모멘트 강도의 1/3 이상
최대 스테럽 간격	$\frac{d}{4}$ 또는 감싸고 있는 종방향 철근 최소직경의 6배 중 작은 값	$\frac{d}{4}$ 또는 감싸고 있는 종방향 철근 최소직경의 10배 중 작은 값	$\frac{d}{4}$ 또는 감싸고 있는 종방향 철근 최소직경의 8배 중 작은 값

표 3 기둥의 소성힌지 영역에서의 배근 비교

적용 부분	NZS		우리나라 기준	
	완전한 연성의 구조물	제한된 연성의 구조물		
횡방향 철근	간격 s_h 내의 단면적	$A_{sh} \geq \frac{\Sigma A_s f_y}{96 f_{yt}} \frac{s}{d_b}$ (좌굴방지) 또는 $A_{sh} = \frac{(1.3 - \rho_l m) s_h h''}{3.3} \frac{A_g f'_c}{A_c f_{yt}} \frac{N^*}{\phi f'_c A_g}$ - 0.006 $s_h h''$ (구속) 중 큰 값 이상	$A_{sh} \geq \frac{\Sigma A_s f_y}{96 f_{yt}} \frac{s}{d_b}$ (좌굴방지) 또는 $A_{sh} = \frac{(1 - \rho_l m) s_h h''}{3.3} \frac{A_g f'_c}{A_c f_{yt}} \frac{N^*}{\phi f'_c A_g}$ - 0.0065 $s_h h''$ (구속) 중 큰 값 이상	D32 이하의 종방향 철근 - D10 이상 사용 D35 이상의 종방향 철근 - D13 이상 사용 (일반 상세)
	간격	단면 직경의 1/4 또는 종방향 철근직경의 6배 중 작은 값 이하	단면 직경의 1/4 또는 종방향 철근직경의 10배 중 작은 값 이하	감싸고 있는 종방향 철근의 최소직경의 8배, 띠철근 직경의 24배, 골조부재 단면의 최소치수의 1/2, 30cm 중 최소값 이하

* A_{sh} : 간격 s_h 내에 위치하는 띠철근(hoop) 및 추가된 띠(cross-tie)의 총 유효면적, mm^2

A_{st} : 띠(stirrup-tie) 한 가닥의 단면적, mm^2

$$\rho_l = \frac{A_{st}}{bh} \quad m = \frac{f_y}{0.85f'_c} \quad \rho_l m \leq 0.4$$

s_h : 띠철근(hoop)의 간격, mm s : 띠(stirrup-ties)의 수직간격, mm

h'' : 띠철근(hoop) 외각을 기준으로 측정된 직사각형 단면의 콘크리트 코어의 치수, mm

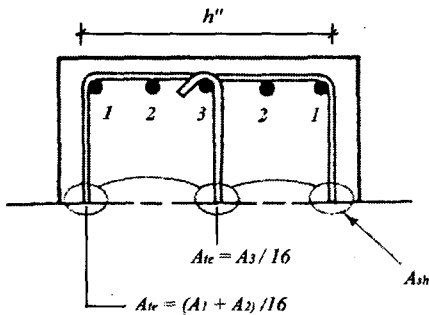


그림 2 기둥 단면 상세

($s = 6d_b$, $f_y = f_{yt}$ 가정)

- (2) 횡방향 철근의 필요단면적의 경우 NZS는 종방향 철근의 좌굴방지와 소성힌지 영역의 구속효과를 고려한 최소값을 제안하였다. 한편, 우리나라기준에서는 지진력을 고려한 특별한 기준은 없으며 철근 상세 일반에 종방향 철근의 직경에 따른 철근 직경의 최소값을 규정하였다.
- (3) 보의 단면을 직사각형으로 가정하면, 소성힌지 영역의 최소압축철근비는 NZS의 제한된 연성에서 요구하는 양이 우리나라 기준보다 크다는 것을 알 수 있다. 단, 이것은 하중조합조건 등을 감안한 철근의 절대량의 양적비교를 의미하는 것은 아니다.

구조물에 작용하는 전단력이 큰 경우 횡방향 철근의 간격은 최대허용간격이 아닌, 전단력에 의해 결정될 것이다. 횡방향 철근이 받는 전단력은 부재에 요구되는 전단력 수요에서 콘크리트가 받는 전단력을 제외한 값이므로, 콘크리트가 부담하는 전단력이 증가함에 따라 횡방향 철근의 수요는 감소할 것이다. 표 4는 골조에서 콘크리트가 부담하는 전단력에 대한 기준을 비교한 것이다.

표 4 콘크리트가 부담하는 전단능력 비교

적용 부분		NZS		우리나라 기준
		완전한 연성의 구조물	제한된 연성의 구조물	
보		$v_c = 0$	$v_c = 0.5 v_b^*$	$v_c = 0.53\sqrt{f'_c}$
기둥	축방향 압축력	$v_c = 0$	$v_c = [0.5 + \frac{1.5N}{A_g f'_c}] v_b^* \geq 0$	$v_c = 0.53 [1 + 0.0071 \frac{N_u}{A_g}] \sqrt{f'_c}$
	축방향 인장력	$v_c = 0$	$v_c = [0.5 + \frac{6N}{A_g f'_c}] v_b^* \geq 0$	$v_c = 0.53 [1 + 0.029 \frac{N_u}{A_g}] \sqrt{f'_c}$

* $v_b = (0.224 + 31.9 \rho_w) \sqrt{f'_c}$, $0.26\sqrt{f'_c} \leq v_b \leq 0.64\sqrt{f'_c}$ (단위 : kg/cm²)

NZS의 완전한 연성의 구조물의 경우 지진 시 콘크리트가 받는 전단력은 무시한다. 그러나 제한된 연성의 구조물은 완전한 연성의 구조물에 비해 부재의 최대비탄성 변형율이 상대적으로 작고 콘크리트의 전단능력의 감소가 작다. 이를 고려하여 콘크리트의 전단능력을 어느 정도 인정하고 있다.

그림 3은 NZS의 제한된 연성의 구조물에 대한 기준과 우리나라 기준에서의 콘크리트가 받을 수 있는 전단능력을 비교한 것이다. 우리나라 기준이 콘크리트의 전단능력을 더 크게 본다는 것을 알 수 있으며, 이러한 차이는 콘크리트의 강도가 높아질수록 커진다. NZS의 경우 콘크리트의 전단능력에서 기둥의 주철근비 또한 고려되었다.

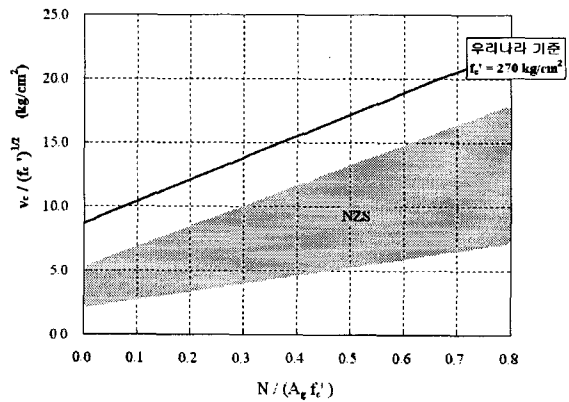


그림 3 축력에 따른 콘크리트의 전단능력 비교

4. 결 론

NZS의 제한된 연성의 상세설계를 우리나라 내진 상세에 적용할 수 있는가를 파악하기 위해 모멘트

골조 구조물에서의 NZS의 제한된 연성($\mu=3$)과 완전한 연성($\mu=6$), 그리고 우리나라 기준 세 가지 경우에 대해 지진에 대한 밀면 전단력을 비교하였다. 그 결과 10~12층 이상의 구조물에서는 우리나라 기준을 이용하여 구한 밀면 전단력이 NZS의 제한된 연성($\mu = 3$)을 적용하여 구한 밀면 전단력보다 크다는 것을 알게 되었다.

소성힌지 영역을 중심으로 모멘트 골조 구조물의 상세설계를 비교한 결과 우리나라 기준에 제시된 보, 기둥의 스테럽 및 띠철근의 최대허용간격이 NZS의 완전한 연성의 구조물과 제한된 연성의 구조물의 중간값이란 것을 확인하였다. 또한 지진발생시 콘크리트가 받을 수 있는 전단능력을 비교한 결과 NZS의 제한된 연성에서의 콘크리트의 전단능력에 대한 기준은 우리나라 기준에 비해 작은 값을 가진다는 것을 확인하였다.

우리나라와 같은 중·약진 지역의 경우 지진력이 설계에 미치는 영향이 비교적 적으므로 이러한 뉴질랜드 내진상세를 구조물의 설계시 참고한다면 보다 합리적이고 경제적인 설계가 가능할 것이다.

감사의 글

이 연구는 과학기술부의 자연재해방재 기술개발사업의 세부과제 “차세대 내진설계 개념과 지진응답 제어기법 연구”의 일부로 수행되었으며, 이 연구지원에 대해서 감사드립니다.

참고문헌

1. NZS 4203 : 1992 Loading Standards Vol. 1 Code of Practice Part 4
2. NZS 4203 : 1992 Loading Standards Vol. 2 Commentary Part 4
3. NZS 3101 : 1995 Concrete Structures Standard Volume 1 The Design
4. NZS 3101 : 1995 Concrete Structures Standard Volume 2 Commentary
5. ACI Committee 318 1995, Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-95) and Commentary. American Concrete Institute. Detroit
6. 사단법인 대한건축학회 (2000), “건축물 하중기준 및 해설”
7. 사단법인 한국 콘크리트학회 (1999), “콘크리트구조설계기준”, 技文堂
8. 사단법인 대한건축학회 (2000), “콘크리트 構造設計基準 建築構造物 設計例題集”