

뉴질랜드 기준에서의 제한된 연성의 RC 구조물 내진설계

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

이한선* 유은진** 우성우***
Lee, Han-Seon Yoo, Eun-Jin 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 concept of structures of limited ductility in NZS, and its applicability to Korean case. A structural wall system which is used as the structural system for typical apartments is taken as an example for the illustration.

1. 연구 배경

구조물의 경제적, 합리적인 내진설계를 위해 반드시 고려되어야 하는 것이 구조물의 연성(ductility)이다. 연성은 구조물의 설계시 불필요한 과다설계를 줄이면서도 강진(強震)이 발생할 경우 구조물이 붕괴되는 것을 막는다.

일반적으로 지진 발생시 구조물에 기대되는 것은 완전한 연성 거동인데, 이러한 경우 특정 위치에서 소성힌지가 형성되며, 이곳에서 지진 에너지가 소산된다. 이 때 소성힌지는 구조물의 연성을 완전히 발휘할 수 있는 충분한 각변위능력을 확보할 수 있도록 철근의 상세배근에 주의를 기울여야 한다.

그러나 특정 구조물의 경우, 중력하중 내지는 풍하중이 미치는 영향이 지진력보다 클 수 있고,

* 고려대학교 건축공학과 부교수, 정회원

** 고려대학교 건축공학과 석사과정

*** 고려대학교 건축공학과 박사과정, 학생회원

지진 발생시 일반적인 구조물에 비해 작은 변위를 가지며, 완전한 탄성 응답과 완전한 연성 응답 사이의 거동을 보인다. 또한 완전한 연성의 구조물에 비해 작은 변위를 가지므로 소성힌지 영역에 대해 설계기준을 완화시킬 수 있을 것이다.

이 논문은 이러한 경우에 관련하여 뉴질랜드 기준(NZS)의 제한된 연성(limited ductility)의 개념을 살피고, 이 개념의 국내 기준에의 적용 가능성을 검토하는 것을 그 목적으로 한다.

2. 제한된 연성(limited ductility)의 개념 및 적용

2.1 개념

구조물의 내재한 강도가 지진시 구조물의 완전 연성 거동을 위해 요구되는 강도보다 월등히 큰 경우, 구조물은 완전한 탄성 내지는 탄성 응답과 완전한 연성 응답 중간의 거동을 보인다. NZS는 구조물의 연성계수 μ 가 $1.25 < \mu \leq 3$ 인 경우를, 제한된 연성을 가진 구조물 또는 구조물의 요소로 정의하였다.

구조물이 지진시 완전한 연성에 요구되는 강도보다 큰 강도를 가지는 경우는 대체로 다음과 같다.

- (1) 중진지역의 구조물, 혹은 중력 하중이나 풍하중 등의 기타 하중에 의한 설계요구가 더 큰 구조물.
- (2) 완전한 연성의 구조물을 설계하는 것이 더 많은 비용이 들 경우.
- (3) 구조물의 유형을 명확히 정의할 수 없는 경우. 지진시 소성 거동 양상을 예측하기 힘든 구조물의 경우, 보다 신중한 설계가 요구되며, 이러한 구조물은 강도를 크게 함으로써 보다 안전한 설계가 가능하다.
- (4) 구조물 일부분에 요구되는 과도한 연성 수요에 대해 부재를 보호하기 위해 구조물의 전체 연성계수를 조정하는 경우.

우리나라의 경우 지진가속도 0.11g의 중·약진 지역이므로 지진에 대한 설계요구가 비교적 적다. 이러한 경우 구조물의 연성을 제한하여 설계하는 것은 철근 배근량을 크게 증가시키지 않으면서도 상세설계를 간단하게 할 수 있도록 도움을 줄 것으로 기대된다.

2.2 골조(Frame)

골조의 내진설계시 강기둥-약보(strong column-weak beam)가 기본원칙이며, 이 경우 소성힌지(plastic hinge)는 대부분 보의 기둥에 접한 부분에 발생하도록 유도된다. 그러나 장스팬 구조물의 경우 중력하중의 영향이 크기 때문에, 보에서의 소성힌지는 기둥과 접한 면에 발생하지 않는다. 이러한 경우 구조물의 연성을 적절히 제한하면 그림 1과 같이 기둥에 소성힌지가 발생하는 소성기구(plastic mechanism)를 고려할 수 있다.

그림 1에서 층 전체의 전단능력에서 외부기둥이 가진 전단능력의 비율은 다음 식과 같이 표현된다.

$$r_v = \frac{\Sigma V_e}{\Sigma V_e + \Sigma V_p} \quad (1)$$

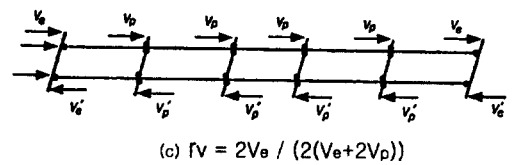
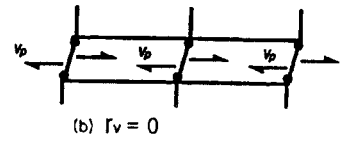
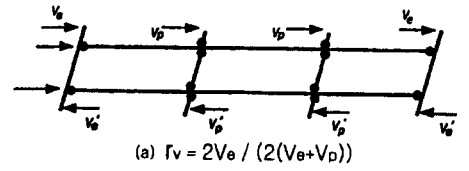
ΣV_e 는 탄성을 유지하는 기둥의 전단능력의 합, ΣV_p 는 소성힌지가 생기는 기둥의 전단능력의 합이다. 이 때 기둥의 전단능력의 총 합은 지진이 일어날 경우 각 층이 받는 전단력보다 커야 한다. 외부기둥이 내부기둥에 비해 적은 모멘트를 받으므로 일반적으로 탄성을 유지하는 것은 외부기둥이 된다.

NZS는 기둥에 소성힌지가 발생하는 시스템의 구조연성계수를 다음과 같이 제시하였다.

$$\mu_d \leq 12 r_v \leq 6 \quad (2)$$

식 (2)를 적용할 경우 그림 1의 구조물에서 다음과 같은 사실들을 알 수 있다.

- (1) $V_p = 1.5 V_e$ 이면 (a)에서 $\mu_d = 4.8$ 이다. 그러므로 $\mu_d = 5$ 를 이용할 수 있다 (뉴질랜드 기준에서 모멘트 저항 골조의 연성계수 $\mu_d = 6$ 이다). 단, 구조물의 상세 설계는 완전한 연성의 구조물과 같다.
- (2) (b)와 같이 약층(soft story)이 발생하는 소성기구는 이용할 수 없다.
- (3) $V_p = 1.5 V_e$ 이면 (c)에서 $\mu_d = 3$ 이다. $\mu_d \leq 3$ 인 경우 상세설계시 일부 규정이 완화된다.



역으로 구조물의 설계시 구조물의 연성계수 μ_d 와 내부기둥의 전단력 V_p 의 값을 알면 식

그림 1 기둥에 힌지가 발생하는 연성의 골조

(1), (2)를 변형한 식 (3)을 이용하여 외부기둥에 요구되는 전단력 V_e 를 구할 수 있다.

$$\Sigma V_e \geq \frac{\mu_d}{12 - \mu_d} \Sigma V_p \quad (3)$$

(3)식에서 V_e 를 크게 하면 구조물의 연성계수가 커질 수 있다. 즉, 기둥에 소성힌지가 발생하는 이러한 소성기구의 경우 벽체와 같은 전단에 강한 요소를 이용하면 효과적이다.

2.3 벽체(Wall)

벽체의 연성을 제한하여 얻을 수 있는 이점은 다음과 같다.

- (1) 연성을 제한하여 벽체의 강도를 크게 하면 지진 발생시 벽체의 압축영역이 작아지므로 압축력을 받는 콘크리트의 구속을 위한 횡방향 구속이 불필요하거나 감소될 수 있다. 즉, 구조물의 설계가 간략해진다.
- (2) 지진 발생시 구조물의 변위가 작아지므로 소성힌지 영역의 전단력의 감소가 완전한 연성의 구조물에 비해 적다. 높이가 낮은 벽체의 경우 휨보다 전단력이 지배적이므로 연성을 제한하는 것이 유리할 수 있다.
- (3) 비정형적인 개구부를 가진 구조물의 경우 정확한 소성 메커니즘을 파악하기 힘들다. 이러한 경우 구조물의 연성을 제한하여 구조물에 내재된 강도를 크게 함으로써 보다 안전한 설계를 보장할 수 있다.

연성을 제한할 경우 벽체에서 완화되는 뉴질랜드 기준은 다음과 같다.

표 1 벽체에 적용되는 기준 비교

적용 부분	완전한 연성의 구조물	제한된 연성의 구조물
콘크리트의 전단용력	$v_c = 0.6 \sqrt{\frac{N}{A_g}}$	$v_c = \left[\frac{5-\mu}{4} \right] \left[0.27\sqrt{f'_c} + \frac{N}{4A_g} \right] \geq 0$
소성힌지 영역의 압축영역 구속 철근 간격	길이방향 철근 직경의 6배, 벽체 두께의 1/2, 혹은 150 mm 이하	길이방향 철근 직경의 10배, 벽체 두께, 혹은 200 mm 이하

3. 우리나라에서의 제한된 연성 개념의 적용 가능성 검토

3.1 개요

예제건물로서 공동주택의 구조형식으로 널리 이용되는 벽식구조를 그림 2와 같이 선택하였다. 1세대 모듈 7.2m × 7.8 m의, 4세대가 연결된 편복도형이며 복도폭은 1.2m이다. N-S 방향의 지진에 대해 동일한 평면의 5층, 10층, 15층 건물의 길이 7.8m, 폭 200mm 벽체 하나의 연성과 강도를 비교 검토하였으며, 구조물에 적용한 지진가속도는 우리나라 기준에 따라 0.11g를 사용하였다. 재료의 강도로는 콘크리트의 경우 5층, 10층, 15층에 대해 240 / 270 / 300 kgf/cm², 철근의 경우 동일한 4000 kgf/cm²를 사용하였다.

뉴질랜드 기준(NZS)에서 제한된 연성의 구조물의 연성은 $1.25 < \mu_d \leq 3$ 의 값을 가진다. 그러므로 NZS에서 $\mu_d = 1.25$, $\mu_d = 2$, $\mu_d = 3$ 에 대해 각각 지진시의 요구강도를 구하고, 우리나라 기준에 따라 벽체에 최소철근을 배근한 경우 벽체의 강도와 이 값을 비교한다. 또한 국내기준에 따른 벽체의 요구강도와 능력을 역시 비교하도록 한다.

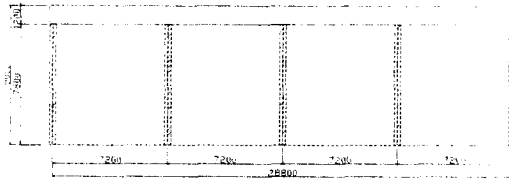


그림 2 예제건물의 평면 (단위 : mm)

3.2 지진하중의 비교

표 2와 3은 NZS와 우리나라 기준 각각에 대해 밀면전단력을 구하는 과정과 그 값을 나타내었다. 지진가속도는 우리나라 기준 0.11g를 동일하게 적용하였으며, 각 기준에 적용되는 계수들을 비교하면 아래와 같다.

표 2 NZS와 우리나라 기준에서의 지진하중과 관련한 계수

비교항목	NZS	우리나라 기준
횡력계수식	$C(T_1, \mu) = C_h(T_1, \mu) S_p R Z L_u$	$\frac{AIC}{R}$
최대지반가속도 0.11 g	$Z = 2.5 \times 0.11$	$A = 0.11$
변위연성능력	$\mu = 1.25, 2, 3$	$R = 3.0$
중간 정도의 지반	$C_h(T_1, \mu)$ 에 반영	$S = 1.2$
T (sec)	$T_1 = 0.0488 (h_n)^{3/4}$ (단위 : m) 5층 : 0.35 10층 : 0.59 15층 : 0.79	$T_1 = 0.0488 (h_n)^{3/4}$ (단위 : m) 5층 : 0.35 10층 : 0.59 15층 : 0.79
건물의 중요도	$R = 1.2$ (국내 기준값과 동일한 값 적용)	$I = 1.2'$ (공동주택의 경우)
기타	$L_u = 1.0$ (극한 한계상태시), $S_p = 0.67$ (거동계수, 별도의 규정 이 없을 경우 0.67 사용)	$C = \frac{S}{1.2\sqrt{T}}$

* 15층 이상인 경우 1.5이나 1.2로 통일하였다.

NZS 4203은 $C_h(T_1, \mu)$ 를 표와 그림으로 제시하였다. 그림 3은 중간정도의 지반에서의 $C_h(T_1, \mu)$ 값이다.

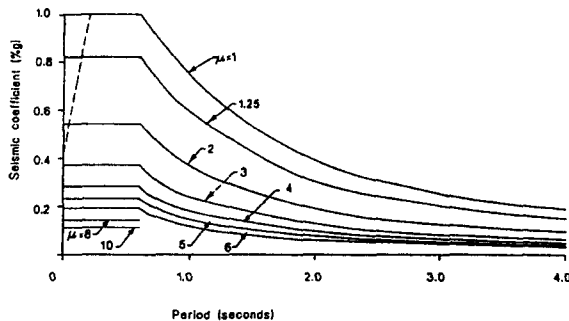


그림 3. 중간정도 지반에서의 $C_h(T_1, \mu)$

예제건물에 표 2를 적용하며, 지진에 의해 발생한 밀면전단력을 구하면 다음과 같다.

표 3 NZS와 우리나라 기준의 밀면 전단력

건물구분	뉴질랜드 기준				우리나라 기준	
	구조 연성계수	C_h	C	$V = C W_i$ (kN)	V (kN)	$1.35 V$ (kN)
5층	$\mu = 1.25$	0.69	0.153	2766	1312	1771
	$\mu = 2$	0.49	0.108	1964		
	$\mu = 3$	0.35	0.077	1403		
10층	$\mu = 1.25$	0.58	0.128	4709	2044	2759
	$\mu = 2$	0.38	0.084	3085		
	$\mu = 3$	0.26	0.057	2111		
15층	$\mu = 1.25$	0.48	0.106	5871	2657	3587
	$\mu = 2$	0.30	0.066	3669		
	$\mu = 3$	0.20	0.044	2446		

표 3에서 우리나라 기준을 이용하여 구한 벽체의 밀면 전단수요 V 는 대체로 NZS의 $2 < \mu < 3$ 을 이용하여 구한 값에 상응함을 알 수 있다.

표 4는 설계에 적용된 하중조합 및 그에 따른 벽체 하나에 적용되는 축력, 모멘트 및 전단력을 계산한 것이다.

표 4 NZS와 우리나라 기준의 하중 조합 비교

NZS*					우리나라 기준**					
하중조합	μ	5층	10층	15층	하중조합		5층	10층	15층	
1.4G	P_u	5554	11108	16662	1.4D +	P_u	6195	12084	18044	
	M_u	1384	2766	4149		M_u	1543	3009	4493	
	V_u				1.7L	V_u				
1.2G + 1.6Q	P_u	5523	11046	16569	0.9D +	P_u	3570	7141	10711	
	M_u	1375	2750	4126		M_u	4611	12696	23541	
	V_u				1.4E	V_u				
G · Q _u · E _u	1.25	P_u	4420	8277	12435	1.05D +	P_u	4646	9063	13533
		M_u	6138	20629	37211					
		V_u	553	942	1174					
	2	P_u	4420	8277	12435	1.275L +	M_u	4746	12784	23498
		M_u	5114	14227	24418					
		V_u	393	617	734					
	3	P_u	4420	8277	12435	1.35E	V_u	262	409	531
		M_u	3946	10384	17311					
		V_u	281	422	489					

* NZS G 고정하중 Q 활하중 Q_u 극한한계상태의 활하중 E_u 지진력

** 우리나라 기준 D 고정하중 L 활하중 E 지진력

표 5는 NZS와 우리나라 규준의 하중 적용의 차이점을 비교한 것이다.

표 5 NZS와 우리나라 규준에 대한 예제 건물의 가정 조건

비교항목	NZS	국내규준
등분포 활하중 (주거) (MPa)	$Q_b = 2.0$	2.0
영향 면적에 의한 저감	$\psi_a = 0.4 + \frac{2.7}{\sqrt{A}} \leq 1.0$	$\psi_a = 0.36 + \frac{4.0}{\sqrt{A}} \leq 1.0$
한계상태에 따른 저감	지붕층의 경우 $\psi_u = 0$ 기타 $\psi_u = 0.4$	없음

3.3 위험부위 요구강도와 설계강도의 비교

우리나라 하중기준과 설계기준을 사용하여 위에서 구한 벽체의 축하중, 모멘트 및 전단력의 수요를 만족하는 단면을 표 6과 같이 이끌어 내었다. 이 때 벽체에 사용된 배근에는 최소철근량이 지배하였으며 단부보강근만이 다르게 설계되었다.

표 6 예제건물의 배근

예제건물	수직근 ($\rho_{\min}=0.0012$)	수평근 ($\rho_{\min}=0.0020$)	단부보강근
5층	D10 @ 450	D10 @ 350	4 - HD16
10층	D10 @ 450	D10 @ 350	6 - HD16
15층	D10 @ 450	D10 @ 350	8 - HD16

그림 4는 예제 건물의 벽체의 능력과 NZS, 우리나라 규준에 의해 요구되는 하중을 P-M 상관도로 나타낸 것이다.

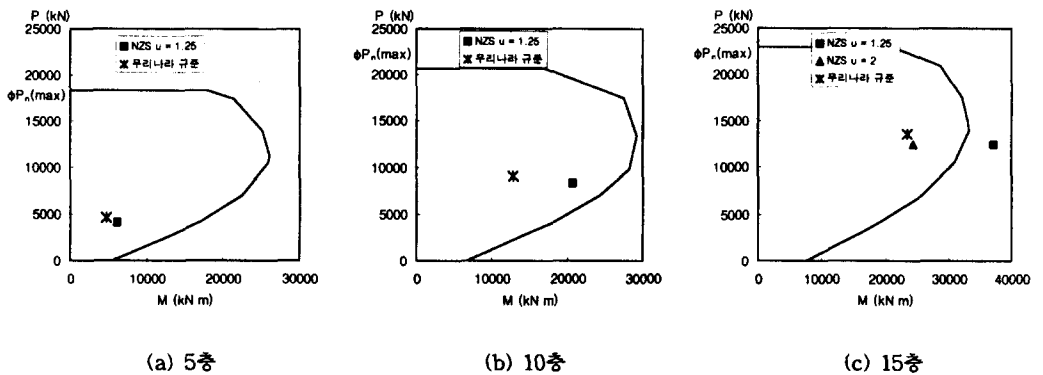


그림 4 예제건물의 NZS, 우리나라 규준 충족 여부 검토를 위한 P-M 상관도

또한 콘크리트의 전단력 $V_c = 1124 \text{ kN}$ 이므로 5층 / 10층 / 15층 모두에서 $V_u \leq 0.5 V_c$ 이다. 그러므로 표 6의 최소철근비를 이용한 전단철근의 배근은 적절한 값이란 것을 알 수 있다.

그림 4로부터 5층, 10층의 경우 NZS에서 $\mu = 1.25$ 일 때의 축하중 및 모멘트 요구강도가 벽체가 가진 능력값 이내에 위치한다. 그러므로 이 경우 0.11g의 지진발생시 구조물의 탄성거동을 기대할 수 있다.

15층의 경우 $1.25 < \mu < 2$ 의 벽체 능력에 상응하는 축하중 및 모멘트 강도를 보여준다. 그러므로 0.11g의 지진시 이 벽체는 제한된 연성의 범위 내에서 거동한다고 할 수 있다.

일반적인 아파트의 층수가 15층 정도인 것을 고려하면, 공동주택에 주로 이용되는 이러한 구조물의 내진설계에 있어 제한된 연성 설계의 개념을 도입하여 상세설계를 간략화할 수 있을 것이다.

4. 결 론

우리나라와 같은 중·약진지역의 경우 강진 지역에 위치한 국가들에 비해 지진력이 설계에 미치는 영향이 비교적 적으므로, 우리나라의 지진 특성에 적합한 내진설계 개념을 정립할 필요가 있다. NZS의 제한된 연성(limited ductility)의 개념은 지진에 의한 영향이 비교적 적은 구조물의 설계시 유용하게 적용될 수 있다. 특히 아파트와 같이 큰 강도를 가진 구조물의 경우 이러한 개념을 도입하면 구조물의 안전성을 유지하면서도 상세설계를 간략히 할 수 있을 것이다.

감사의 글

이 연구는 과학기술부의 자연재해방재 기술개발사업의 소과제 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. T. Paulay, 1996, "Seismic Design of Concrete Structures : The Present needs of Society", 11WCEE Proceeding
6. 사단법인 대한건축학회 (2000), "건축물 하중기준 및 해설"
7. 사단법인 한국 콘크리트학회 (1999), "콘크리트구조설계기준", 技文堂