

콘크리트 구조물에 대한 뉴질랜드 내진설계 기준의 특성

Characteristics of Seismic Design of Concrete Structures in New Zealand Standards (NZS)

이한선* 우성우** 유은진***
Lee, Han-Seon Woo, Sung-Woo Yoo, Eun-Jin

ABSTRACT

This paper briefly summarizes the basic concepts and main characteristics of seismic design of New Zealand Standards(NZS) with regard to reinforced concrete(RC) structures. NZS uses the concept of the capacity design and the limit state design to satisfy the requirements of serviceability and safety. Plastic mechanisms and details with respect to the limit state of safety are briefly presented in this paper.

The understanding of this advanced seismic design concept will enable us to implement the basic theory of capacity design and contribute to the development of Korean seismic code in new generation.

1. 서 론

내진설계가 발달한 국가의 내진설계 개념을 파악하고 이를 분석하는 것은 국내실정에 적합한 내진설계 개발의 지식기반을 구축하는데 큰 도움이 될 수 있다. 따라서 본 논문은 이를 위하여 세계적으로 널리 주목을 받고 있는 뉴질랜드 기준 NZS(New Zealand Standards)의 기본 개념 및 주요 특징에 대해 철근 콘크리트(RC) 구조를 중심으로 분석하여 보았다.

2. NZS

2.1 NZS의 기본 구성

철근 콘크리트 구조의 설계에 이용되는 NZS는 두 가지로 나눌 수 있다.

* 고려대학교 건축공학과 부교수, 정회원

** 고려대학교 건축공학과 박사과정, 학생회원

*** 고려대학교 공학기술 연구소 연구원

NZS 4203(1992, Loading Standard)는 Volume 1 - Code of practice와 Volume 2 - Commentary의 두 권으로 구성되는데 내진설계 관련규준은 4장(Part 4 Earthquake Provision)에 수록되었다. NZS 3101(1995, Concrete Structures Standard) 역시 Part 1 - The Design과 Part 2 - Commentary의 두 권으로 구성되며 각 장의 끝에 지진을 고려한 설계규준을 다루었다.

일반적인 내진설계 규준과 같이 NZS는 구조물의 설계목표를 한계상태(Limit State)를 이용하여 표현하고 있다. 이러한 한계상태 중 가장 기본적인 2가지가 사용성 한계상태(Serviceability Limit State)와 극한 한계상태(Ultimate Limit State)이다.

사용성 한계상태는 비교적 자주 발생하는 가벼운 지진에 의한 손상 방지를 목적으로 하며, 이 때 구조물은 탄성 범위 내에서 거동한다. 사용성 한계상태에서 구조물을 지배하는 특성은 강성(stiffness)인데, 콘크리트의 경우 부재의 강성을 결정하는 실질적인 단면이차모멘트 I_g 와 단면적 A_g 의 값은 부재에 발생한 균열의 정도에 따라 다른 값을 가진다. NZS는 구조물의 연성계수에 따른 이러한 유효값들을 부재의 전단면적에 대한 값 I_g 와 A_g 에 대한 비로 표현하였다.

극한 한계상태는 구조물에서 가장 중요한 인명보호(Preservation of Life)를 목적으로 한다. 이 때 구조물은 설계지진에 의해 실질적으로 보수가 불가능한 잔류소성변형이 발생하는 것은 용인되나, 붕괴되어서는 안된다. 이러한 거동과 관련한 구조물의 가장 중요한 특성은 연성(ductility)이다. 구조물에서의 연성은 일반적으로 소성현저에서의 비탄성 회전에 의해 발현된다.

2.2 주요 특징

구조연성계수(Structural Ductility Factor)

NZS는 극한한계상태에서 설계지진력을 결정할 때 구조연성계수를 이용하도록 규정하고 있다. 구조연성계수 μ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\mu = \Delta_u / \Delta_y \dots\dots\dots(1)$$

Δ_u = 극한 횡변위, Δ_y = 항복 시작시의 횡변위

NZS는 연성(ductility)에 따라 구조물의 유형을 분류한 후, 유형별로 각기 다른 값의 연성계수(Ductility Factor)를 이용하여 설계지진력을 구한다. μ 는 1.25와 6 사이의 값을 가지며 구조물의 연성이 증가할수록 그 값은 커지는데, 기타 조건이 동일할 경우 연성계수가 작을수록 설계 지진력이 커진다.

콘크리트 구조물에서의 구조물의 분류와 그에 따른 연성계수는 도표 1과 같다.

제한된 연성의 구조(Structures of Limited Ductility)

NZS는 연성에 따른 구조의 분류를 상세히 하기 위해 제한된 연성의 구조라는 분류항목을 설정하였다. 이러한 구조물이나 부재는 2 또는 3의 구조연성계수를 갖는데, 이는 탄성 거동의 구조물($\mu = 1.25$)과 연성의 구조물($\mu = 6$)의 중간값이다. NZS 3101:1995는 17장에 이러한 구조물을 상세히

규정하였다.

표 1. 콘크리트의 구조연성계수, μ

구조물의 유형	콘크리트 구조물
1. 탄성 반응의 구조물	1.25
2. 제한된 연성의 구조물	
(a) 모멘트 저항 골조	3
(b) 벽체	3
(c) 내력벽(Cantilevered face loaded walls)	2
3. 연성 구조물	
(a) 모멘트 저항 골조	6
(b) 벽체	5/Z
2개 이상의 독립벽체	5/Z
2개 이상의 연결(coupled)벽체	$5/Z \leq (3A+4)/Z \leq 6/Z$
단일 독립벽체	4/Z
Note $1.0 \leq Z=2.5-0.5A_r \leq 2.0$ h_w 밀면에서 최상부까지의 벽체의 수직높이 $1/3 \leq A=TL/M_o \leq 2/3$ L_w 벽체의 수평 길이 $A_r = h_w/L_w$ T 연결벽체의 밀면의 축하중 L 연결벽체의 수직기준축의 거리 M_o 연결구조벽체를 포함한 구조물 밀면의 전체 전도모멘트	

제한된 연성의 수요는 다음과 같은 경우 발생할 수 있다.

- (1) 구조물의 강도가 지진에 대해 완전한 연성 반응에 소요되는 강도보다 큰 경우, 자중에 의한 하중 혹은 풍하중의 영향이 지진에 의한 영향보다 큰 경우가 이에 속한다.
- (2) 구조물이 완전한 연성거동을 발현하는 것이 어렵거나 비용이 많이 들 때, 지진 발생시의 연성 수요를 감소시키기 위해 더 큰 지진 설계력을 적용하는 것이 보다 이득일 수 있다.
- (3) 구조 유형을 명확히 정의하기 힘든 경우, 정밀한 모델링이 힘들 경우 비탄성 거동의 예측은 더욱 어려워지며, 이런 경우 안전한 설계를 위해 구조물의 연성계수를 작게 가정한다.
- (4) 과도한 국부적인 연성 요구로부터 부재를 보호하기 위해 구조물의 연성 수요를 감소시키는 경우.

지반의 등급 분류

NZS는 지반을 강성에 따라 (a)암반 혹은 매우 단단한 지반, (b)중간정도의 지반, (c)부드러운 지반의 세 가지 범주로 구분한다. 지반의 유형은 고유주기(Natural Period) T값과 관련되는데, $T < 0.25$ 초인 경우 혹은 암반(岩盤)에 위치한 대지의 경우 (a)에, $T > 0.6$ 초인 경우 혹은 일정한 토성치를 가진 흙이 일정한 깊이 이상이 될 경우 (c)에, 나머지는 (b)에 속한다.

지반의 등급에 따라 기본지진위험 가속도계수(Basic Seismic Hazard Acceleration Coefficient)의 값이 틀려지는데, 기타 조건이 같을 경우 지반이 단단할 수록 그 값이 작다.

정형성(Regularity)

건물의 정형성은 평면에 대한 정형성과 입면에 대한 정형성의 두 항목으로 구분된다.

건물의 정형성은 해석법에 영향을 준다. 평면 및 입면에 대한 정형성을 모두 만족할 경우 등가 정적 해석법(Equivalent Static Method)의 이용이 가능하며, 2차원 해석이 가능하기 위해서는 평면에 대한 정형성을 필수적으로 만족시켜야 한다. 평면 및 입면에 대한 정형성 조건을 만족하지 않는 경우는 다중모드에 근거한 3차원 해석법을 사용하여야 한다.

해석법

NZS는 설계지진반응의 해석법으로 등가정적 해석법, 모드반응 스펙트럼 해석법(Modal Response Spectrum Method), 시간이력 해석법(Time History Method)의 세 가지 해석법을 제시하고 있다. 이중 모드반응 스펙트럼 해석법, 시간이력 해석법은 다중모드에 근거한 해석법이다.

건물의 규모가 작거나 구조물의 1차주기가 작은 경우, 일정 조건의 정형성을 만족시키는 경우 등 비교적 단순한 구조물에 대해서 등가정적 해석법의 적용이 가능하며, 그 외의 경우에는 동적 해석을 바탕으로 한 모드반응 스펙트럼 해석법, 시간이력 해석법 등을 적용시켜야 한다.

또한 규준에 명시된 평면에 대한 정형성을 만족시키지 못하는 경우 반드시 3차원 해석이 이루어져야 한다.

설계스펙트럼(Design Spectrum)과 횡력계수(Lateral Force Coefficient)

구조물의 1차 모드만을 반영하는 등가정적 해석법에서는 횡력계수가, 다중 모드를 반영하는 모드반응 스펙트럼 해석법과 시간이력 해석법에서는 설계스펙트럼이 적용된다. 각각의 해석법에 대해 사용성 한계상태, 극한 한계상태 두 가지 경우에 대하여 횡력계수 C 혹은 설계스펙트럼 $C(T)$ 를 고려해야 한다.

설계스펙트럼과 횡력계수는 기본지진위험 가속도계수 $C_b(T, \mu)$ 의 값을 기본으로 한다. $C_b(T, \mu)$ 는 구조물 자체의 특성을 반영하는 값으로서 주기 T 와 구조연성계수 μ 에 관련된 함수이며, NZS는 지반의 등급 (a), (b), (c) 각각에 대해 표와 그래프를 사용하여 그 값을 제시하였다.

그림 1은 지반등급 (a)에서의 기본지진위험 가속도계수 $C_b(T, \mu)$ 의 값을 나타낸 것이다.

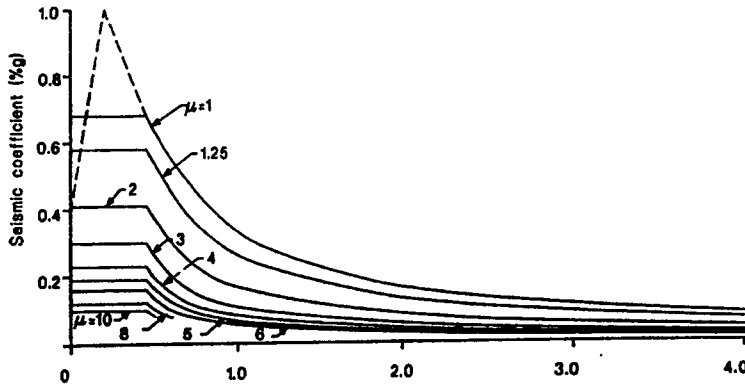


그림 1 지반등급 (a)에서의 기본지진위험 가속도계수 (NZS 4203 : 1992)

기본지진위험 가속도계수를 구한 후, 다음에 서술된 요소들을 고려하여 횡력계수 혹은 설계스펙트럼을 구한다.

구조거동계수(Structural Performance Factor) S_p 는 구조물의 거동을 고려하기 위한 계수이며, 일반적인 경우 0.67의 값을 이용한다.

구조물에서의 위험도 계수(Risk Factor) R은 구조물의 중요도를 반영하며 표 2와 같다.

표 2 구조물의 위험도 계수

분류	상세	R
I	인명 관련 혹은 구조물의 기능상실이 사회적으로 큰 영향을 주는 건물	1.3
II	균중을 수용하는 건물	1.2
III	공동체에 큰 가치를 가진, 공공의 건물	1.1
IV	다른 모든 범주에 포함되지 않는 건물	1.0
V	부속건물	0.6

구조물이 위치한 지역에 따라 지역계수(Zone Factor) Z의 값이 달라진다. 그림 2는 뉴질랜드의 지역계수를 나타낸다.

한계상태계수(Limit State Factor)는 사용성 한계상태를 고려할 경우 $L_s = 1/6$ 을, 극한 한계상태의 경우 $L_u = 1.0$ 을 적용한다.

등가정적 해석법의 경우 횡력계수를 구하는 식은 다음과 같다.

사용성 한계상태의 경우

$$C = C_h(T, 1) S_p R Z L_s \dots\dots\dots(2)$$

극한 한계상태의 경우

$$C = C_h(T, \mu) S_p R Z L_u \dots\dots\dots(3)$$

설계스펙트럼을 구하는 식은 다음과 같다.

사용성 한계상태의 경우

$$C = C_h(T, 1) S_p R Z L_s \dots\dots\dots(4)$$

극한 한계상태의 경우

$$C = S_m C_h(T, \mu) S_p R Z L_u \dots\dots\dots(5)$$

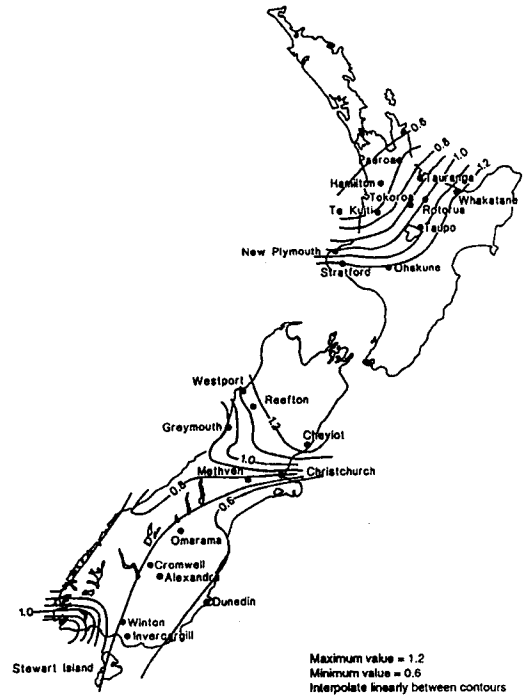


그림 2 지역계수(zone factor), Z

S_m 은 스케일계수(Scaling Factor)이며, 1차 주기에 따라 그 값이 틀려진다. S_m 의 적용은 모드반응 스펙트럼 해석법과 시간이력 해석법에서 약간의 차이를 보인다.

3. 콘크리트 구조물에 대한 내진설계 적용

3.1 설계 일반

내진설계의 기본 목적은 지진에 의한 하중에 대해 구조물의 전반적인 저항능력이 크게 감소하

지 않으면서 적절한 에너지 소산능력을 제공토록 하는 것이며, 이러한 특성을 만족시키기 위해서는 구조물의 연성을 파악하여야 한다.

구조물의 연성 파괴를 위해, NZS는 재료적 측면에서 콘크리트 공시체의 압축강도와 주근·띠철근 등의 철근 강도를 제한하여 구속효과(confining effect)·균열의 제어 등을 보장하며, 구조물의 특성을 반영하는 구조연성계수 μ 를 이용하여 구조물 유형에 따른 연성의 변화를 설계에 반영한다. 구조연성계수 μ 와 지반의 등급 등을 이용하여 기본지진위험 가속도계수를 구할 수 있으며, 이를 근거로 설계스펙트럼을 산출한다.

구조물의 내진설계에는 능력설계법(Capacity Design)이 적용된다. 이를 위해 구조물의 소성기구(Plastic Mechanism), 초과강도(overstrength) 등의 고려가 필요한데, 소성기구는 가능하면 강기둥-약보(strong column-weak beam mechanism)를 원칙으로 하며, 전층의 기둥 양단에 소성힌지가 발생하는 약층(soft storey)이 발생하지 않도록 한다.

그림 2는 다층 건물에서 생각할 수 있는 다양한 소성기구를 보여주고 있다.

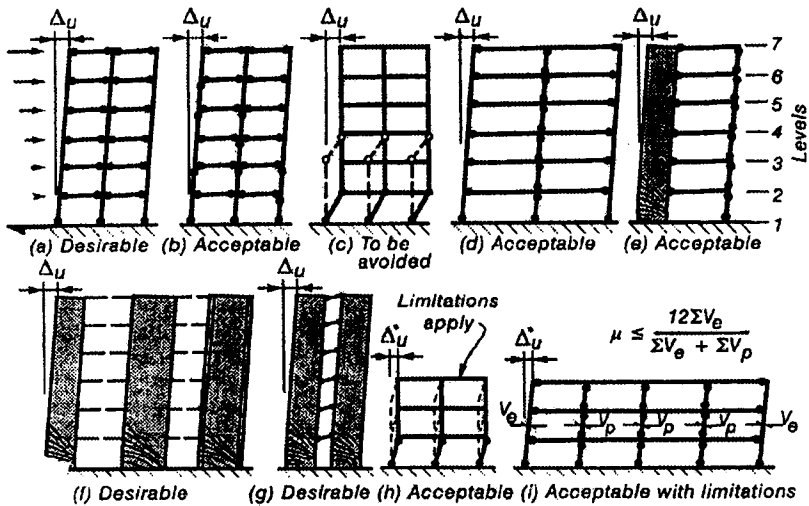


그림 3. 다층 건물의 소성기구 (Paulay, 1996)

소성기구의 결정 후 구조물의 설계하중에 대한 저항능력과 연성에 대한 요구조건을 만족하도록 부재의 치수와 상세를 결정한다. 구조물의 연성을 확보하기 위해서는 소성힌지가 발생할 가능성이 있는 영역에 충분한 능력을 제공해야 하며, 이를 위해 보, 기둥, 보-기둥 접합부, 벽체 등에 대해 각각 규정을 두고 있다.

3.2 설계 상세

보

보의 경우 위험 단면이 지지하는 기둥에 접한 면, 또는 그로부터 보 길이 h 혹은 500mm 내로

떨어진 위치에 발생할 경우, 보 깊이의 2배의 영역을 잠재소성힌지 영역으로 보며, 이 영역에서의 후프의 배근 간격은 보 깊이의 1/4, 길이방향 철근직경의 6배를 초과하지 않도록 규정하고 있다. 반면 임계 단면이 보 경간에 위치할 경우 임계단면의 양쪽으로 보 깊이의 2배 길이의 영역을 잠재소성힌지 영역으로 보며, 이 때는 후프의 배근 간격이 보 깊이의 1/3, 길이방향 철근직경의 10배를 초과하지 않는 완화된 규정을 이용한다.

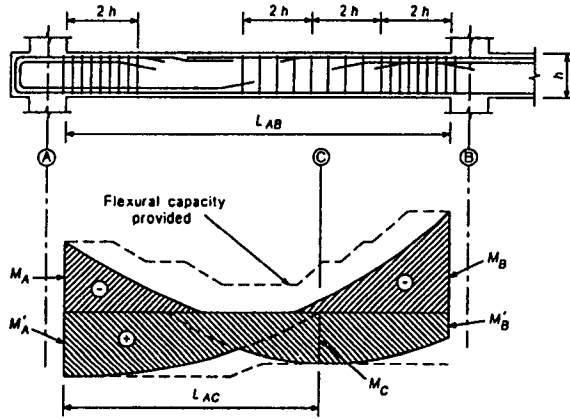


그림 4. 후프의 배근이 요구되는 소성힌지의 위치 (NZS 3101 : 1995)

기둥

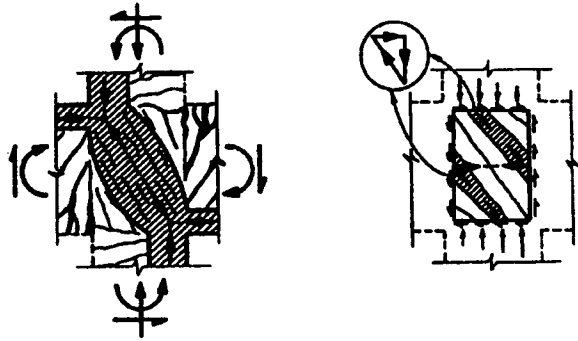
기둥의 경우 극한한계상태의 설계 축하중에 따라 단부에 발생하는 잠재소성힌지 영역의 크기가 달라지며, 나선철근과 띠철근을 구분하여 배근에 대한 규정을 제시하였다. 횡방향 철근의 양은 축력의 정도에 의존하므로 축하중이 작은 경우 길이방향 철근의 좌굴 방지 조건에 의해, 축하중이 증가하면서 콘크리트의 구속 조건에 의해 그 양이 결정된다.

보-기둥 접합부

보-기둥의 접합부는 골조에 뒤지지 않는 능력을 가져야 하며, 철근의 미끄러짐 및 전단파괴가 발생하지 않고 확실한 탄성 거동이 보장되어야 한다. 이러한 요구를 충족시키기 위해 NZS는 수평·수직 전단철근의 필요량과, 내부 보-기둥 접합부의 길이방향 철근의 정착에 대한 규정을 제시하였다.

접합부의 전단저항은 그림 4와 같은 스트럿 메커니즘과 트러스 메커니즘 두 가지로 나누어 생각할 수 있다. 스트럿 메커니즘의 경우 이론적으로 철근이 필요하지 않으므로, 일정 정도의 저항을 스트럿 메커니즘이 받은 후 남은 저항에 대한 수직·수평 전단철근의 필요량을 설계하도록 하였다.

또한 철근의 바람직한 부착 거동을 위해 철근의 직경을 제반 조건을 고려하여 일정값 이하로 제한하였다.



(a) 스트럿 메커니즘

(b) 트러스 메커니즘

그림 5. 접합부의 모멘트저항기구

4. 결론

뉴질랜드의 지진규준(NZS)의 구성과 기본 개념 및 주요한 특징을 RC 구조물을 중심으로 살펴 보았다. 콘크리트 구조물에 적용되는 NZS는 하중 관련 규준 NZS 4203과 콘크리트 구조물 관련 규준 NZS 3101이며, 이를 이용하여 적절한 콘크리트 구조물을 설계할 수 있다.

구조물의 설계에는 한계상태 설계법이 적용되며, 지진력의 적용시 구조물의 연성능력 및 지반 조건 등을 고려한다. NZS는 각 부재가 충분한 저항능력과 연성을 가질 수 있도록 소성기구 결정 및 부재의 상세설계를 제시하고 있으며, 이러한 규준을 적용함으로써 지진시 구조물의 안전성을 보장할 수 있다.

이러한 뉴질랜드의 내진설계 기법에 대한 이해는 우리나라의 보다 합리적인 내진설계기준 개발의 기초지식으로 활용될 수 있을 것이다.

참고문헌

1. NZS 4203:1992 Loading Standards Volume 1 Code of Practice Part 4
2. NZS 4203:1992 Loading Standards Volume 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. R.Park, 1996, "The Revised New Zealand Concrete Design Standard", 11WCEE Proceeding
6. T.Pauly, 1996, "Seismic Design of Concrete Structures : The Present needs of Society", 11WCEE Proceeding
7. M.Recla, 1998, "Comparison of Eurocode 8 to other codes", proceeding of 11th European Conference on Earthquake Engineering.