

RC 구조물에 대한 Eurocode 8의 내진설계 기준 검토

Review of Design Provisions for Earthquake Resistance of RC Structures in Eurocode 8

이 한 선*
Lee, Han-Seon

허 윤 섭**
Heo, Yun-Sup

이 주 은***
Lee, Joo-Eun

ABSTRACT

In this paper, the basic concepts and main characteristics in Eurocode 8, which deals with earthquake-resistant design, are reviewed regarding the design of reinforced concrete structures. Eurocode uses the limit-state design method to satisfy the requirements of safety and serviceability.

This kind of information can serve to establish the up-coming Korean seismic code which is comprehensive and appropriate to the moderate seismicity region by constituting an important part in the basic data-pool.

1. 서론

우리나라의 실정에 적합하고 합리적인 건축구조물의 내진설계 개념 또는 철학을 정립하기 위한 한 방법으로, 외국에서 현재 사용되고 있는 내진설계 기준뿐만 아니라 앞으로 발전될 것으로 예측되는 내진설계 개념을 파악하고 이를 분석하여 추후 우리나라 차세대 내진설계 개념수립의 기초자료로 활용할 수 있을 것이다. 본 논문에서는 이에 근거하여 유럽에서 현재 개발되고 있는 유럽 통합 기준인 Eurocode의 발생 배경과 내진기준인 Eurocode 8의 기본 개념 및 주요 특징을 중심으로 분석하였다.

2. 유럽의 지진발생 현황 분석

Eurocode에 대해 살펴보기에 앞서 유럽의 지진발생 현황을 간단히 살펴보기로 한다.

직접학적인 관점에서 지중해 지역은 두개의 대륙판(아프리카판과 유라시아판)이 충돌하는 지점에 위치해 있으며, 이에 따라 유럽에서의 지진은 대개 이 지역을 중심으로 발생한다. 따라서 지중해에 면한 지브랄타(Gibraltar)에서 터키까지의 지역이 중·강진 지역에 해당하며, 지중해 연안 동북부지역에 위치한 그리스, 구 유고 연안, 터키 서부지역의 지진발생 빈도는 매우 빈번하다. 그리스는 가장 활발한 지진활동영역에 위치해 있으며, 유럽 대륙에서 지진활동으로 매년 방출되는 에너지의 50% 정도가 이곳에서 방출된다. 이태리 전지역에 대한 지진발생 평균 재현주기는 진도(MCS) 7, 8, 9에 따라 각각 3년, 16년, 43년이며, 지진활동은 이태리 남부지역이 가장 활발하다. 포르투갈의 지진활동은 전 지역에 걸쳐

* 정회원, 고려대학교 건축공학과 부교수

** 정회원, 고려대학교 건축공학과 박사과정

*** 고려대학교 건축공학과 석사과정

간등하게 분포되어 있으며, 약·중진지역에 해당하며, 중남부 내륙지방에서는 강진발생 가능성이 있는 것으로 보고되고 있다. 스페인에서의 진원지는 반도 경계부근에 집중되어 있다. 스페인 남부와 알프스, 프랑스 남부지역(프로방스), 스위스 및 라인 지구는 중진지역에 해당한다. 독일, 프랑스, 영국 등 중·북부 유럽에서의 지진활동은 지중해 연안에 비해 활발하지는 않으며, 영국(0.04g~0.10g)에서는 70년대 초반부터 지진하중을 핵발전 시설물에 적용하기 시작했을 뿐 지진에 대한 대비책이 뚜렷하지 않다. 표 1과 그림 1에 유럽의 역사지진(강진)과 최근에 발생한 지진지역을 나타내었다 [3][4].

표 1 유럽의 역사지진(강진) 발생 현황

날 짜	위 치	사상자	Ms
1693.01.11	이태리(Sicily)	60,000	-
1755.11.01	포르투갈(Lisbon)	70,000	8.7
1908.12.28	이태리(Messina)	85,000	7.5
1915.01.13	이태리(Avezzano)	29,980	7.5
1926.06.26	그리스(에게해)	-	7.7
1939.12.26	터키(Erzincan)	30,000	8.0
1977.05.04	루마니아	1,500	7.2
1988.12.07	터키-러시아 국경	25,000	7.0

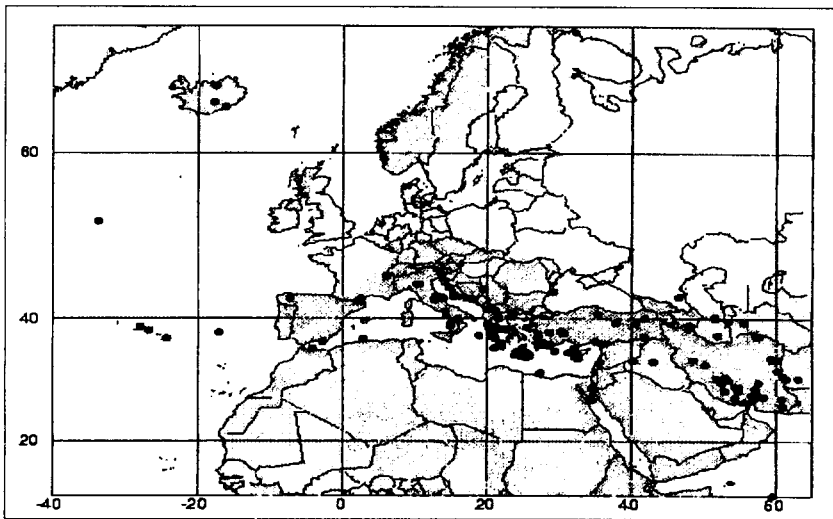


그림 1 최근 유럽 지진발생 현황 (1994~1999)

3. Eurocode의 개발 현황

1980년대 초반에 European Economic Community(EEC)는 건축물 및 기타 토목공학 분야의 구조물 설계에 대한 일련의 포괄적인 실행 기준을 작성하기로 의결하였으며, 이는 유럽의 실무 현황을 서로 통일하고 무역장벽을 제거하기 위한 목적을 갖는다. 그 이후에 이러한 작업을 CEN(Comité Européen de Normalisation)에서 수행하게 되었으며, CEN 회원국으로는 오스트리아, 벨기에, 덴마크, 핀란드, 프랑스, 독일, 그리스, 아이슬란드, 아일랜드, 이탈리아, 룩셈부르크, 네덜란드, 노르웨이, 포르투갈, 스페인, 스웨덴, 스위스, 그리고 영국 등이 있다.

유럽 공동체 위원회(CEN)에는 표준화를 위한 전반적인 프로그램을 관리하는 Technical Board가 있으며, 그 산하에 Technical Committee(TC)와 Technical Working Group(TWG)이 있다. 이 중, TC250에서 건축물 및 토목 구조물에 대한 일련의 통일된 기준작성을 담당하고 있으며, BSI(British Standards Institution)에서 이를 관장하고 있다. 현재, 실무 적용에 대한 타당성을 검토하기 위해 통합기준에 대

한 가규준안(European Prestandard : ENV)을 제시하고 있으며, 이러한 과정을 거쳐 각 국가에서 현재 시행중인 규준을 대체할 수 있는 "Structural Eurocode"를 제시하는 것을 최종목표로 하고 있다. 이에 따라 총 9개의 "Structural Eurocode"가 현재 개발 중에 있다. Eurocode 8(EC8)은 구조물에 대한 내진 규준을 제시하고 있으며, 기타 Eurocode 즉, 일반사항을 규정한 EC1, 콘크리트 구조물에 대한 EC2, 또는 철골구조에 대한 EC3 등과 병행하여 사용하도록 되어 있다. 다시 EC8은 모두 6개의 Part로 구성되며, 본 논문에서는 EC8 Part 1에서 구조물에 대한 일반사항을 규정한 Part 1-1과 Part 1-2 및 콘크리트 구조물에 대한 Part 1-3의 내용을 중심으로 살펴보기로 한다.

4. Eurocode 8

4.1 기본 개념

기타 Eurocode와 같이, EC8은 성능(Performance)에 기초하고 있으며, 지진에 대한 구조물의 성능이 인명안전, 손상제한, 및 기능유지에 적합하도록 그 설계목표를 분명히 제시하고 있다. 이러한 설계목표는 다음과 같이 구조물에 대한 2가지 기본적인 설계요구조건 즉, 붕괴방지(No collapse)와 손상제한(Damage limitation)으로 표현된다. 여기에서 붕괴방지에 대한 요구조건은 설계지진에 대해서 구조물에 국부적인 또는 전체적인 붕괴가 발생하지 않도록 하기 위한 것이며, 손상제한에 대한 요구조건은 설계지진에 비해 발생확률이 큰, 즉 짧은 재현주기를 갖는 지진에 의한 손상발생 및 이로 인한 사용성(Serviceability) 제한을 방지하기 위한 것이다. 이러한 기본적인 요구조건에 대해 2가지 한계상태, 즉, 극한한계상태(Ultimate Limit State : ULS) 및 사용성한계상태(Serviceability Limit State : SLS)를 제시하고 있으며, 이러한 한계상태에 대해 구조물의 성능(Performance)을 검토하도록 규정하고 있다.

이러한 기본적인 규정을 제외한, 대부분의 규정들은 각 국가의 지진발생 현황 및 정치·경제·사회적인 여건을 고려하여 각 회원국에서 자율적으로 규정할 수 있도록 유연성을 부여하고 있다. 지진지역의 규정 및 기타 계수값에서 이러한 예를 찾아 볼 수 있다.

지반운동을 묘사함에 있어서 통일성을 부여하기 위해, EC8에서는 암반 또는 단단한 지반에서의 유효 최대지반가속도(Effective Peak Ground Acceleration)를 사용하여 설계지진을 묘사하도록 규정하고 있으며, 그 외의 상세한 규정에 대해서는 각 국가의 자율에 맡기고 있다. 또한 지역에 따른 지진발생 특성을 고려할 수 있도록 스펙트럼에 사용되는 계수값에 대해서도 기준값을 제시하여 이를 참고하여 조정할 수 있도록 허용하고 있다.

4.2 Eurocode 8의 주요 특징

설계스펙트럼(Design Spectrum)

내진성능을 확보하기 위해서는 구조물이 연성에 의한 비선형 거동을 하는 것이 바람직하다. 이를 고려하기 위해서는 비선형 해석법을 사용해야 하나, EC8에서는 여러 규준에서와 같이, 거동계수(Behavior Factor : 식 5 참조)를 사용하여 탄성스펙트럼 값을 감소시킨, 선형해석에 의한 설계스펙트럼을 제시하고 있다.

하중조합

EC8에서는 ULS에 대해 요소를 검토하는 경우, 다음과 같이 하중을 조합하도록 규정하고 있다.

$$\Sigma G_{kj} + \gamma_I \cdot A_{Ed} + P_k + \Sigma \psi_{2i} \cdot Q_{ki} \quad (1)$$

여기에서, G_{kj} 는 고정하중(permanent action), P_k 는 프리스트레스 하중, A_{Ed} 는 기본 재현주기를 갖

는 지진하중에 대한 설계값, γ_i 는 중요도 계수(0.8~1.4)이며, Q_{ki} 는 적재하중(variable action), ψ_{2i} 는 적재하중에 대한 조합계수를 의미한다.

A_{Ed} 를 산정하는 경우, 하중 $\psi_{2i} \cdot Q_{ki}$ 가 지진 발생시 구조물 전체에 걸쳐 영향을 주지 않을 가능성을 고려해야 한다. 이에 따라 계수 ψ_{Ei} 를 사용하여 각 질량 사이의 비강접(nonrigid) 집합부에 의한 질량의 기여도가 감소하는 것을 고려하여 다음과 같이 지진하중에 의한 영향을 평가해야 한다.

$$\Sigma G_{ki} + \Sigma \psi_{Ei} \cdot Q_{ki} \quad (2)$$

$$\psi_{Ei} = \varphi \cdot \psi_{2i} \quad (3)$$

여기에서, ψ_{Ei} 는 적재하중(variable action)에 대한 조합계수이며, φ (0.5~1.0)는 높이에 따른 분포계수로 상층부의 거동을 고려하기 위한 것이다.

개념설계(Conceptual Design) 및 정형성(Regularity)

건축물의 정형성에 대한 규정은 평면정형 및 입면정형에 대한 항목으로 분류되며, 이에 따라 모델링 방법, 해석기법, 및 거동계수의 값이 결정된다. 즉, 평면 정형성에 의해 구조물의 모델링 방법이 결정되며, 입면 정형성에 따라 거동계수값이 조정된다. 기본적으로는 다중모드 해석법(Multi-modal analysis)을 사용하도록 하고 있으나, 평면 및 입면이 모두 정형인 경우에는 특별히 간소화된 모드해석법(Simplified modal analysis)을 사용할 수 있도록 허용하고 있다.

표 2 구조 정형성에 따른 내진설계

정형성(Regularity)		간소화 방법		거동계수의 조정 (K_R)
평면	입면	모델링	해석법	
예	예	2차원	Simplified	1.0
예	아니오	2차원	Multimodal	0.8
아니오	예	3차원	Multimodal	1.0
아니오	아니오	3차원	Multimodal	0.8

연성등급(Ductility Class : DC)

내진 구조물은 지진에 대한 저항능력(Resistance) 뿐만 아니라 연성(Ductility)을 동시에 확보하고 있어야 하나, 이 두 가지 성능 사이에 어느 정도의 상호조율이 가능하다는 인식에 따라 EC8에서는 이러한 개념을 도입하게 되었다. 실제로 구조물의 저항능력과 연성은 구조물의 비선형 응답과 관계가 있으며, 따라서 EC8에서는 설계자로 하여금 각 설계특성에 맞는 연성등급을 선택할 수 있도록 허용하고 있다. 즉, 지진특성에 따라 강제적으로 연성등급을 규정하기보다는 저항능력과 연성을 상호 조율함으로써 최적의 설계결과를 도출할 수 있도록 설계의 유연성을 부여하고 있다.

거동계수(Behaviour Factor, q)

구조물의 저항능력과 연성은 비선형응답의 발생정도와 관련이 있다. 이러한 저항능력과 연성의 상호관계를 거동계수(q)로 표현한다. 즉, 구조물의 에너지 소산능력을 고려하여, 선형해석으로 부터 산출한 하중을 감소시킬 목적으로 설계에 사용되는 계수로, 재료, 구조시스템 및 설계과정에 따라 그 값이 규정된다(표 2 및 식 5 참조), 지진하중의 수직성분에 대해서는 구조물의 에너지 소산능력이 매우 작기 때문에 거동계수를 1.0으로 간주한다.

해석법

기본적인 해석법(Reference Method)으로 다중모드반응스펙트럼(Multi-modal Response Spectrum) 해

석법과 간소화된 모드반응스펙트럼(Simplified Modal Response Spectrum) 해석법을 제시하고 있으며, 이러한 해석법 외에 파워스펙트럼 해석(Power Spectrum Analysis), (비선형)시간이력 해석, 및 주파수 영역 해석(Frequency Domain Analysis)을 그 대안으로 제시하고 있다.

평면 및 입면에 대한 정형성 조건을 만족하지 않는 대부분의 경우에 대해 다중모드에 근거한 해석법을 사용해야 한다. 이 해석법을 사용하기 위해서는 동적해석에 대한 기본적인 이해가 필요하다. 그러나 유럽 건축물 중 많은 부분이 개인 주택 또는 저층 구조물로 이루어져 있기 때문에 규준에서는 정형이고 간단한 구조물에 손쉽게 사용할 수 있도록 간소화된 해석법을 제시하고 있으며, 여기에서 밀면 전단력 F_b 는 다음과 같이 산정된다.

$$F_b = S_d(T_1) \cdot W \quad (4)$$

여기에서, T_1 는 구조물의 기본진동주기이며, $S_d(T_1)$ 는 주기 T_1 에 대한 설계스펙트럼값이며, W 는 식 2에 의한 건축물의 총 중량을 의미한다. 이렇게 산출된 밀면전단력은 1차모드 형상 또는 선형분포에 근거하여 각 층으로 분배된다.

비틀림에 의한 영향을 분석하기 위해서, 5% 우발편심(e_1)을 사용하여 실제로 발생한 편심(e_0)을 증가시키거나 감소시켜 비틀림 해석을 수행하는 것이 일반적이다. 이렇게 산정된 편심에 대해 3차원 해석을 수행함으로써, 편심에 의한 동적효과를 산출할 수 있다. 그러나 평면 모델 사용에 대한 요구조건을 만족하는 경우에는 구조물의 주축방향으로 2개의 평면모델을 사용하여 각각 독립적으로 해석을 수행할 수 있다. 이러한 평면 해석에서 비틀림에 의한 동적효과를 고려하기 위해 위의 2가지 편심 외에 추가로 편심 e_2 를 사용하도록 규정하고 있다.

안정성 검토

인명안전에 위협을 줄 수 있는 구조물의 붕괴에 대한 안정성을 검토하기 위해서 극한 한계상태(ULS)가 제시된다. 극한한계상태에서는 구조물의 저항능력(resistance) 및 연성(ductility), 2차 효과(second order effect), 전도(overtuning) 및 미끌림(sliding)에 대한 안정성(stability), 수평격막(diaphragm)의 초과강도(overstrength), 기초의 저항능력(resistance) 등에 대한 검토가 수행되어야 한다. 그리고 손상 발생에 따른 사용성의 제약에 대해 검토하기 위해서, 사용성 한계상태(SLS)가 제시되며, 여기에서는 비구조요소의 손상 또는 취성파괴를 방지하기 위한 층간변위의 제한에 초점을 두고 있다.

4.3 콘크리트 구조물에 대한 내진규준

콘크리트 건축물에 대한 내진설계의 기본 설계철학은 지진에 의한 수평 및 수직하중에 대해서 구조물의 전반적인 저항능력이 크게 감소하지 않고 적절한 에너지 소산능력을 제공하는 것이다. 즉, 하중 조합에 대해서 모든 구조요소에 적절한 저항능력을 제공해야 하며, 연성 파괴모드에 대해 충분한 신뢰성을 확보해야 한다.

이러한 이력에너지 소산능력과 관련하여, 콘크리트 구조물을 3가지 연성등급 즉, DC“L”(low ductility), DC“M”(medium ductility), DC“H”(high ductility)로 분류한다. 콘크리트 구조물에 대한 비내진 규준인 EC2에 따라 설계되고, 연성확보를 위한 최소한의 상세규정을 적용한 구조물은 DCL에 해당하며, 취성 파괴를 유발하지 않고 비탄성 범위에서 거동할 수 있도록 설계 및 상세된 구조물은 DCM에, 그리고 이력에너지 소산능력이 크고 바람직한 메카니즘을 유도할 수 있는 구조물은 DCH에 해당한다. 이러한 3가지 연성등급에 따라 가용한 연성이 서로 다르므로, 각 등급에 따라 거동계수를 식 5와 같이 규정하고 있으며, 앞에서 언급한 바와 같이, 이렇게 산정된 거동계수를 사용하여 탄성스펙트럼값을 감소시킴으로써 설계하중을 산출할 수 있다.

$$q = q_0 k_D k_R k_W \geq 1.5 \quad (5)$$

여기에서, q_0 는 구조시스템에 대한 계수로, EC8에서는 골조시스템($q_0 = 5$), 이중시스템[골조가 지배적인 경우($q_0 = 5$) 또는, 벽체가 지배적인 경우($q_0 = 5$ (coupled wall), 또는 $q_0 = 4.5$ (uncoupled wall))], 그리고 벽체시스템 [$q_0 = 5$ (coupled wall), 또는 $q_0 = 4.0$ (uncoupled wall)]의 3가지 구조시스템을 정의하고 있다. k_D 는 연성등급(DC)에 대한 계수로, DCH, DCM, 및 DCL에 대해서 각각 1.00, 0.75, 0.50로 규정된다. k_R 은 입면정형에 대한 계수로 정형인 구조물에 대해서 1.00, 비정형인 구조물에 대해서 0.80의 값을 갖는다(표 2 참조). k_W 는 벽체를 가진 구조시스템의 파괴모드를 반영하기 위한 계수로 골조시스템에 대해서 1.0으로 규정되며, 벽체 및 코어시스템에서는 벽체의 형상비(aspect ratio)에 따라 그 값이 규정된다.

EC8에서는 DCH와 DCM에 대해 능력설계법(Capacity Design)을 적용하고 있으며, 이를 사용하여 설계하중을 산출한다. 그 이후에 저항능력(resistance) 및 연성(ductility)에 대한 요구조건을 만족하도록 부재의 치수 및 상세를 결정하며, 이러한 요구조건은 각 연성등급에 따라 서로 다르게 규정된다. 구조물 전체의 연성을 확보하기 위해서는 소성현지가 발생할 가능성이 있는 영역에 충분한 능력을 제공해야 하는데, 이를 위해 보, 기둥, 보-기둥 접합부, 벽체 등에 대해 각 연성등급별로 규정을 두고 있다.

보에 대해서 살펴보면, DCH의 경우 기둥면으로 부터 보 깊이의 2배 이상이 되는 영역에 후프를 배근해야 하며, 그 간격은 보 깊이의 1/4, 후프직경의 24배, 150 mm 중 작은 값 이하로 하며, 또한 철근의 좌굴을 방지하기 위해 길이방향 철근직경의 5배를 초과하지 않도록 규정하고 있다. 이에 대해 DCM의 경우는, 그 규정을 다소 완화하여, 보 깊이의 1.5배 이상의 영역에, 보 깊이의 1/4, 후프직경의 24배, 200 mm 중 작은 값 이하로 하고, 또한 길이방향 철근직경의 7배를 넘지 않도록 규정하고 있다.

기둥에 대해서도 각 연성등급에 따라 위험단면 영역 및 배근에 대한 규정을 제시하고 있으며, 소성현지에 의한 연성수요를 만족시키기 위해 최소 곡률연성(Conventional Curvature Ductility Factor; CCDF)을 확보하도록 규정하고 있다. DCH, DCM, DCL에 대해 각각 최소 13, 9, 5의 곡률연성비를 규정하고 있다.

5. 결론

이상에서, 유럽의 지진발생 현황과 유럽통합규준인 Eurocode의 개발현황 및 구조물에 대한 내진규준인 Eurocode 8의 기본 개념 및 주요 특징에 대해서 살펴보았다. Eurocode는 능력설계법 및 한계상태설계법을 적용하고 있으며, 유럽 각국의 지역적인 특성 등을 고려하여 각 국가에 적합한 규준을 작성할 수 있도록 기본적인 철학을 제시하고 있다.

감사의 글

이 연구는 과학기술부의 자연재해방재 기술개발사업의 소과제 일부로 수행되었으며, 이 연구지원에 대해서 감사드립니다.

참고문헌

1. CEN (European Committee for Standardization), 1994, Eurocode 8: Design Provisions for Earthquake Resistance of Structures Part 1-1, 1-2 and 1-3, European Prestandards (ENV) 1998-1-1, 1998-1-2, 1998-1-3, Brussels.
2. George G. Penelis and Andreas J. Kappos, 1997, Earthquake-Resistant Concrete Structures.
3. USGS, United State Geological Survey, <http://www.neic.cr.usgs.gov/neis/general/handouts>.
4. CSEM/EMSC, European-Mediterranean Seismological Centre, <http://www-csem.bruyeres.cea.fr/html>.