

국제 내진 기준 (ISO 3010) 소개 및 평가 Introduction of ISO 3010 - Bases for Design of Structures-Seismic Actions on Structure

한상환*
Han, Sang-Whan

윤장근**
Yoon, Jang-Keun

이리형***
Lee, Li-Hyung

ABSTRACT

This paper introduces the ISO 3010 which is the design standard for seismic action of International Standard Organization. Specially this paper focuses on the philosophical background and the weakness of ISO 3010. The ISO 3010 (Bases for design of structures-Seismic actions on structures) was made in 1998 by the efforts of ISO/TC98 which is one working group of ISO. TC98 deals with "Bases for design of structures" in the field of architectural and civil engineering. The revised Committee Draft ISO/CD 3010 was made in February 1999. Even if ISO 3010 has not been completed yet this study carry out critical review of this committee draft.

1. 서론

이 논문에서는 국제 내진 기준 ISO 3010을 소개하고 평가하는데 그 목적이 있다. 이 논문은 제 12회 세계지진공학회 (12th WCEE)에서 Ishiyama 교수가 발표한 논문을 토대로 정리 보완한 것이다.

구조물의 설계와 지진력에 관한 국제 기준 ISO 3010 [ISO 1988]은 International Standard Organization/Technical Committee(이하 ISO/TC98 라함)의 실무그룹 (Working Group-이하 WG 라함)에 의해 1988년에 발행되었다. TC98은 "구조물의 설계"에 대해 다루고 있으며 건축, 토목 분야에서의 국제적 표준화를 그 목표로 하고 있다. 이 ISO 기준은 각 국가의 지역 기준의 기초가 될 것이다. ISO 3010에서는 지진하중 산정과 내진설계에 대한 원칙만을 다루고 있으며 지진력 산정에 필요한 계수 값을 특별히 규정하고 있지 않고 있다. 이러한 계수의 값은 각 지역기준에서 정한 값에 근거할 수 있다. 그러나 이 기준에서는 지진력을 산정하기 위한 계수결정에 관한 많은 내용을 포함하고 있다. 따라서 ISO 3010은 새로운 기준 제정에 있어서 유용한 자료로서 활용될 수 있다. ISO 3010의 개정은 1995년 처음 실시되어 개정을 위한 ISO/CD 3010 위원회(committee draft) [ISO/TC98, 1999]는 1999년 2월에 결성되었다. 개정작업은 아직 진행중이며 TC98 회의의 의견에 따라 수정될 것이다. 이 논문에서는 TC98의 활동과 ISO 3010의 개정된 내용 그리고 ISO/CD 3010에 의한 지진력 산정시 고려해야 할 사항에 대해 소개한다.

* 한양대학교 교수, 정회원

** 한양대학교 석사과정, 학생회원

*** 한양대학교 교수, 정회원

2. 국제 표준화 기구 ISO와 기술위원회 TC98

국제 표준화 기구(International Standardization Organization : ISO)는 국가 기준 단체들의 세계적인 연합이라 할 수 있다. 국제 기준 작성을 위한 작업은 통상 ISO/TC (ISO/Technical Committees -이하 TC라 함)에 의해 수행된다. ISO 내에는 현재 대략 200개의 기술위원회 (TC)가 존재하며 각 기술위원회는 몇몇 소위원회(Sub-Committees -이하 SC라 함)로 구성되어 있다. 또한 각 소위원회는 몇몇 실무그룹(Working Group-이하 WG라 함)으로 구성되어 있다. 현재 ISO는 대략 600개의 SC와 2000개의 WG가 있다.

기술위원회 중 하나인 ISO/TC98은 “구조물의 설계”에 대해 다루고 있다. TC98의 목표는 건축, 토목 분야에서의 국제적 표준화를 구축하는 것이며 이 시스템은 구조물과 구조 재료에 대한 규격을 제시하는 각 국가별 지역 기준에 기반이 될 것이다. TC98은 1961년에 설립되어 그 사무국은 폴란드 위원회에 소속되어 있었으며 TC98은 21명의 참여회원과 37명의 옵서버(각 국에서 한 명의 참여회원과 한 명의 옵서버)로 구성되어 있다. TC98은 3가지의 주된 업무 (1) 전문용어와 기호, (2) 구조물의 신뢰성, (3) 구조물의 하중, 외력, 기타 작용하중을 3개의 SC를 통해 분담하고 있다.

SC1은 TC98에서 제시하는 기준과 기타 문서에서 사용되고 있는 용어의 정의와 해설을 다루고 있다. 이 용어들은 의미의 모호성 없이 정확히 이해되어야 하며 용어의 의미는 각 국 언어에 따라 다르게 사용되어서는 안되기 때문에 용어에 대한 일관된 시스템을 구축하는 것은 매우 중요하다.

SC2는 구조물의 신뢰성에 관련한 것이다. 구조물의 신뢰성은 그 안전성과 사용성의 조합으로서 설명할 수 있다. 이것은 두 가지 독립된 한계상태(1) 극한한계상태와 (2) 사용한계상태로서 입증되며 각 한계상태에서 하중, 재료 특성, 구조적 치수 등과 같은 모든 매개변수는 임계변수(random variable)로서 고려한다.

SC3는 다양한 하중 등급에 대한 기반을 제시한다. 설계용 지진력은 WG1에서 다루고 있는데 이 WG는 SC3에 속하지 않고 직접적으로는 TC98에 속한다. 지진력은 나라별로 조건이 크게 다르기 때문에 상대적인 범주에서 제시되어야 하지만 실제 데이터를 다루는 방법이나 측정하는 방법은 표준화되어야 한다.

3. ISO 3010과 그 개정

현행 ISO 3010(1988년 초판)은 TC98의 WG1 실무그룹에서 제시하고 있다. ISO 3010은 1996년 세계지진공학회(WCEE)의 IAEE(International Association for Earthquake Engineering)가 발행한 Seismic Regulations a World List-IAEE 1996에 처음 소개되면서 많은 내진설계 관련자들에게 알려지기 시작하였다.

TC98에 의해 제시된 ISO 3010 기준은 건축 시공 분야에 있어서 참고자료로서 활용되고 있으며 “기준 작성자들을 위한 기준(Code for Code Writers)”으로 불리고 있다. ISO 3010에서는 지진하중 산정과 내진설계에 대한 원칙만을 다루고 있으며 지진력 산정에 필요한 계수 값을 특별히 규정하고 있지는 않는다. 그러나 이 기준에서는 계수 설정에 관한 유용한 정보를 제시하고 있으며 설계 시 고려되는 항목과 계수들을 대부분 포함하고 있기 때문에 ISO 3010은 구기준을 개정하거나 신기준을 제정하는데 있어서 유용한 자료로서 활용될 수 있다.

개정된 ISO/CD 3010은 1 배경과 적용범위, 2 표준 참고자료, 3 용어와 정의, 4 기호와 약어, 5 내진설계에 대한 기초, 6 내진설계의 원칙, 7 지진력 산정에 관한 원칙, 8 등가정적해석에서의 지진력 산정, 9 동적해석에서의 지진력 산정, 10 paraseismic 효과의 평가의 10개의 절로 구성되어 있다.

또한 ISO/CD 3010은 A 구조물의 신뢰성과 관련된 하중계수, 지진위험도 지역계수와 지진동 계

수, B 구조계수, C 정규화된 설계응답스펙트럼, D 지진력 분포계수와 전단력 분포계수, E 지진력의 구성 요소, F 비틀림 모멘트, G 동적 응답, H 감쇠비, J 응답 조절 시스템, K Paraseismic 효과의 10개의 부록을 포함하고 있다.

ISO 기준은 다음과 같은 두 가지 목표를 가지고 있고 이 목표를 만족하기 위하여 기준이 제정되었다.

- a) The structure should not collapse nor harm human lives by severe earthquake ground motions that could occur at the site (Ultimate limit state : ULS)
- b) The structure should withstand moderate earthquake ground motions which may be expected to occur at the site during the service life of the structure with damage within accepted limits (Serviceability limit state : SLS)

4. ISO 3010에서의 지진력 산정 방법

구조물의 해석은 동적해석 또는 등가정적해석에 의해 수행한다. 동적해석은 고층 건물이나 비정형 건물(입면, 질량 분포, 강성 분포)에 대해 수행하고, 등가정적해석은 보통 정형 건물에 대해 전형적인 탄성해석을 사용하여 수행한다.

4.1 등가정적해석

등가정적해석에서 구조물은 극한한계상태(ULS)와 사용한계상태(SLS)에 대해 안전해야 한다. 단, 극한한계상태에 대한 안전성이 확인되면 사용한계상태에 대한 안전성 확인은 생략할 수 있다.

(1) 층지진력과 층전단력 산정

- a) 극한한계상태(Ultimate Limit State : ULS)

극한한계상태(ULS)에 대한 i층에서의 층지진력 $F_{E,u,i}$ 은 다음과 같다.

$$F_{E,u,i} = \gamma_{E,u} k_Z k_{E,u} k_D k_R k_{F,i} \sum_{j=1}^n F_{G,j}$$

극한한계상태(ULS)에 대한 i층에서의 층전단력 $V_{E,u,i}$ 은 다음과 같다.

$$V_{E,u,i} = \gamma_{E,u} k_Z k_{E,u} k_D k_R k_{V,i} \sum_{j=1}^n F_{G,j}$$

여기서, $\gamma_{E,u}$: 극한한계상태에서 구조물의 신뢰성에 관한 하중계수

k_Z : 지진위험도 지역계수 (각 국 내진기준에서 규정)

$k_{E,u}$: 극한한계상태에서 지진동 계수

k_D : 구조계수 (구조물의 연성, 허용 변형, 복원력 특성, 초과강도에 따라 분류)

k_R : 정규화된 설계응답스펙트럼 값

$k_{F,i}$: i층의 지진력 분포계수 ($\sum k_{F,i} = 1$ 이다.)

$k_{V,i}$: i층의 전단력 분포계수 ($k_{V,i} = 1$ 이고 최상층에서 가장 크다)

$F_{G,j}$: j층의 중력하중, n : 층수

- b) 사용한계상태 (Serviceability Limit State : SLS)

사용한계상태(SLS)에 대한 i층에서의 층지진력 $F_{E,s,i}$ 은 다음과 같다.

$$F_{E,s,i} = \gamma_{E,s} k_Z k_{E,s} k_R k_{F,i} \sum_{j=1}^n F_{G,j}$$

사용한계상태(ULS)에 대한 i층에서의 층전단력 $V_{E,s,i}$ 은 다음과 같다.

$$V_{E,s,i} = \gamma_{E,s} k_Z k_{E,s} k_R k_{V,i} \sum_{j=1}^n F_{G,j}$$

여기서, $\gamma_{E,s}$: 사용한계상태에서 구조물의 신뢰성에 관한 하중계수

$k_{E,s}$: 사용한계상태에서 지진동 계수

(2) 하중계수 ($\gamma_{E,u}$, $\gamma_{E,s}$)와 지진동 계수 ($k_{E,u}$, $k_{E,s}$)

상대적으로 높은 지진위험도 구역에 대한 $\gamma_{E,u}$, $\gamma_{E,s}$ 와 지진동 계수 $k_{E,u}$, $k_{E,s}$ 는 다음과 같다.

도표 1. 하중계수 $\gamma_{E,u}$, $\gamma_{E,s}$ 와 지진동 계수 $k_{E,u}$, $k_{E,s}$

한계 상태	중요도	$k_{E,u} \neq k_{E,s}$			$k_E = k_{E,u} = k_{E,s}$		
		$\gamma_{E,u}$	$\gamma_{E,s}$	재현주기	$\gamma_{E,u}$	$\gamma_{E,s}$	재현주기
극한 한계 상태	a) 높음	1.5-2.0	0.4	500년	3.0-4.0	0.2	100년
	b) 보통	1.0			2.0		
	c) 낮음	0.4-0.8			0.8-1.6		
사용 한계 상태	a) 높음	1.5-3.0	0.08	20년	0.6-1.2	0.2	100년
	b) 보통	1.0			0.4		
	c) 낮음	0.4-0.8			0.16-0.32		

(3) 지역계수 (k_2)

지진위험도가 높은 지역에서 보통 이 계수는 1이고 지진위험도가 낮아짐에 따라 이 계수는 감소한다. 1보다 큰 계수는 지진 위험도가 매우 높은 지역에 사용될 수 있다. 지진동 계수를 나타내는 등고선(contour map)은 규정된 지역계수 대신 사용할 수 있다.

(4) 구조계수 (k_D)

k_D 는 연성이 우수한 시스템의 경우 1/5~1/3, 연성이 보통인 시스템의 경우 1/3~1/2, 연성이 부족한 시스템의 경우 1/2~1로 분류되며 두 계수 $k_{D\mu}$ 와 $k_{D\delta}$ 의 곱으로서 정의된다.

$$k_D = k_{D\mu} \times k_{D\delta}$$

여기서, $k_{D\mu}$: 연성, 허용 변형, 복원력 특성 관련 계수, $k_{D\delta}$: 초과강도 관련 계수

(5) 정규화된 설계응답스펙트럼 계수 (k_R)

$$T=0 \text{ 일 때, } k_R=1$$

$$0 < T \leq T_c' \text{ 일 때 } \text{선형보간}$$

$$T_c' < T \leq T_c \text{ 일 때 } k_R = k_{R0}$$

$$T > T_c \text{ 일 때 } k_R = k_{R0} \left(\frac{T_c}{T} \right)^{\eta}$$

여기서, k_R : 설계응답스펙트럼 값

k_{R0} : 지반 성질과 구조물 특성(감쇠)에 의존하는 계수. 보통 지반에서 감쇠비 0.05인 구

조물의 경우 k_{R0} 는 2~3

T : 구조물의 기본주기

T_c : 단단한 지반에서 0.3~0.5초, 보통 지반에서 0.5~0.8초, 연약 지반에서 0.8~1.2초

T_c' : 지반조건과 관련된 코너주기, T_c 의 1/5에서 1/2

η : 맥수 1/3~1 $\eta=1$ 인 경우 응답속도는 $T > T_c$ 일 때 $(\frac{\eta}{2\pi} k_{R0} T_c)$

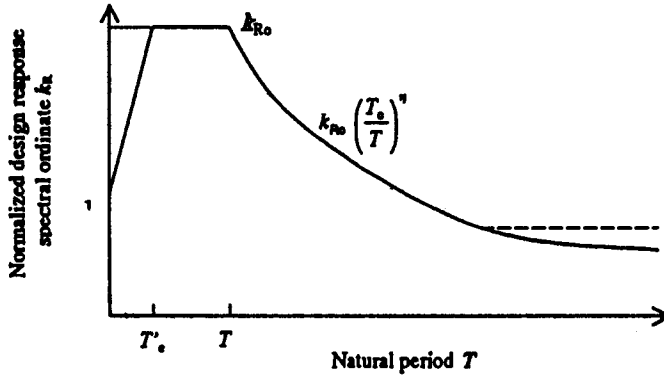


그림 C.1 - 정규화된 설계응답스펙트럼

(6) 층지진력 분포 계수($k_{F,i}$)

$$k_{F,i} = \frac{F_{G,i} h_i^\nu}{\sum_{j=1}^n F_{G,j} h_j^\nu}$$

여기서, $F_{G,i}$: i 층의 중력하중, h_i : 밑면에서 i 층까지의 높이, n : 밑면 위로의 층수
 맥수 ν

- 2층 이하 건물, $T \leq 0.2$ 에서 $\nu=0$ - 저층 건물, $0.2 < T \leq 0.5$ 에서 $\nu=0 \sim 1.0$
- 중층 건물, $0.5 < T \leq 1.5$ $\nu=1.0 \sim 2.0$ - 고층 건물, $T > 1.5$ 에서 $\nu=2.0$

고층 건물의 지진력 분포계수 $k_{F,i}$

$$K_{F,n} = \rho, \quad K_{F,i} = (1 - \rho) \frac{F_{G,i} h_i}{\sum_{j=1}^n F_{G,j} h_j}$$

여기서, ρ : 최상층에서의 집중하중을 나타내는 계수(대략 $\rho=0.1$ 이다.)

(7) 층전단력 분포 계수($k_{V,i}$)

$$k_{V,i} = 1 + k_1(1 - a_i) + k_2(\frac{1}{\sqrt{a_i}} - 1), \quad a_i = \frac{\sum_{j=i}^n F_{G,j}}{\sum_{j=1}^n F_{G,j}}$$

여기서, k_1, k_2 : 구조물의 높이 또는 기본 주기에 관한 계수(0~1), a_i : 정규화된 중량

계수 k_1 과 k_2

- 매우 낮은 건물의 경우 $k_1 \cong 0$ 이고, $k_2 \cong 0$
- 저층 건물의 경우 $k_1 \cong 1$ 이고, $k_2 \cong 0$
- 중층 건물의 경우 $k_1 \cong 0.5$ 이고, $k_2 \cong 0.5$
- 고층 건물의 경우 $k_1 \cong 0$ 이고, $k_2 \cong 1$

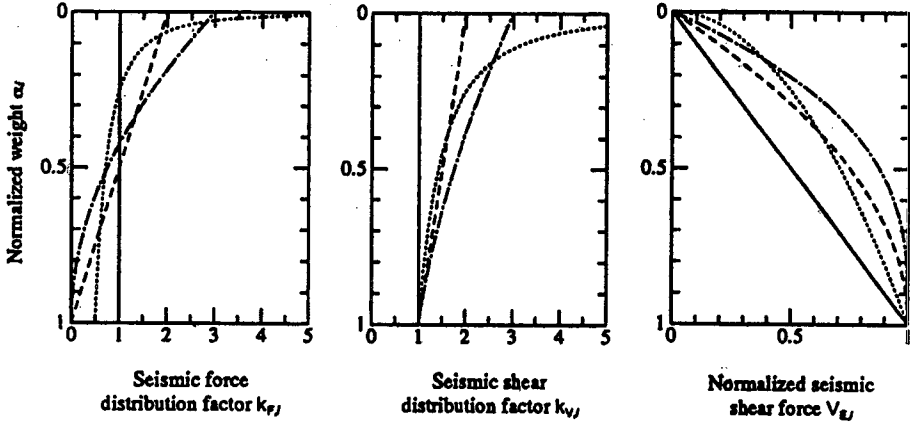


그림 2. 지진력 매개변수의 분포

4.2 동적해석

동적해석을 수행할 때에는 적절한 해석 모델과 적절한 지진동 또는 설계 응답스펙트럼이 선정되어야 한다. 선형 또는 등가 선형 시스템에 대해서는 응답 스펙트럼 해석을 수행하고 비선형 시스템에 대해서는 시간 이력 해석을 수행한다.

4.2.1 응답 스펙트럼 해석

각 진동 모드의 응답을 특징한 지반의 응답스펙트럼 또는 정규화된 응답스펙트럼으로부터 구한다. 응답 스펙트럼해석에서 최대 동적 응답은 SRSS(Square Root of Sum of Squares : SRSS)법 또는 CQC(Complete Quadratic Combination : CQC)법으로부터 산정한다.

a) SRSS법

서로 다른 모드가 couple 되어 있지 않은 경우에 사용한다.

$$S = \sqrt{\sum_{i=1}^n S_i^2}$$

여기서, S : 최대 응답, S_i : i 차 모드에서의 최대 응답

b) CQC법

서로 다른 모드가 couple 되어 있는 경우에 사용한다. 이 식은 random vibration 이론에 의해 유도된다.

$$S = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n S_i \rho_{i,k} S_k}$$

$$\rho_{i,k} = \frac{8\sqrt{\xi_i \xi_k (\xi_i + \chi \xi_k) \chi^{3/2}}}{(1 - \chi^2)^2 + 4 \xi_i \xi_k \chi (1 + \chi^2) + 4(\xi_i^2 + \xi_k^2) \chi^2}$$

여기서, ξ_i, ξ_k : i 차, k 차 모드의 감쇠비, χ : k 차 모드 진동수에 대한 i 차 모드 진동수의 비

4.2.2 시간 이력 해석

시간 이력 해석에서는 실제 계측된 지진 기록 또는 인공 지진 기록을 사용한다.

a) 계측된 지진 기록

인접 지반에서의 강직 기록 또는 지질학적, 지형학적 특성이 유사한 지반에서의 강직 기록을 사용한다. 이러한 지진 기록은 한계상태와 지반의 지진 활동도에 따라 조정되어야 한다.

b) 인공 지진 기록

인공 지진동의 매개변수를 고려하여 지역의 지질학적, 지형학적 성질을 통계적으로 반영한다. 매개변수로는 지배적인 주기, 스펙트럼 형상, 발생 경과 시간, 지진 강도 등이 있다.

4.2.3 구조 해석 모델

구조 해석 모델은 실제 구조물의 동적 특성을 반영하여야 한다. 고려되어야 하는 동적 특성으로는 a) 기초와 지반의 coupling 효과 b) 기본모드와 고차모드에서의 감소 c) 복원력 특성 d) 비구조 요소의 효과 e) 비틀림 효과 f) 수직 요소의 축변형 또는 휨변형 g) 강성의 비정형성 h) 바닥 다이어프램의 강성 효과 등이 있다.

5. 결론

ISO/CD 3010과 현행 우리기준과의 차이점은 ISO 3010 기준이 완전하지는 않지만 성능설계 개념을 도입하고 있다는 것이다. 특히 두 개의 한계상태와 각 한계상태에 관련한 지진하중을 정하고 있다. 따라서 ISO 기준이나 최근 북미에서 내진설계 기준들에서 성능설계가 강조되고 크게 도입된 것을 고려해 볼 때 국내에서도 이에 대한 대비를 해야할 것이다. ISO 3010 에서도 다음과 같은 문제가 아직까지 남아 있으며 이에 대한 개정이 시급하다고 할 수 있다.

- ① ISO 3010의 극한한계상태에 대한 설명으로 인명보호와 붕괴 방지를 동일하게 취급하여 정하고 있는데 인명보호와 붕괴방지 수준은 다른 한계 상태로 설정하는 것이 일반적이다. 특히 인명보호에 대해서는 미국의 경우 500년 재현주기의 지진을 사용하고 붕괴방지에 대해서는 2500년 지진을 사용한다.
- ② 이 기준에서는 등가정적해석으로 지진하중계산을 위하여 총지진력과 총전단력 공식을 따로 정하고 있다. 우리 나라 기준의 경우 각 층에 작용하는 전단력은 고려하는 층 상부층들의 총지진력을 모두 합한 값으로 계산된다. 하지만 ISO 3010은 총전단력 계산시 분포식이 사용하므로 결과치는 우리 나라 기준과 차이가 난다. 부록에서는 이에 대한 이유를 층강성이 달라지는 경우 ISO 3010에서 정한 분포식을 사용하는 것이 타당하다고 설명하고 있다. 하지만 층강성이 매우 다른 경우에는 동적해석을 통하여 지진력을 산정하기 때문에 총지진력과 총전단력의 분포식을 달리하는 것은 큰 의미가 없다 할 수 있다.
- ③ 극한한계상태 (USL)에 대한 총지진력과 총전단력 산정시 우리 기준의 반응수정계수 (R)과 유사한 k_D 계수를 사용한다. 하지만 이 계수는 기존 R 과 비교하여 조금도 발전된 형태가 아니다. 또한 부록 B에서는 이 계수가 어떤 요소들을 고려하여 결정할 수 있는 것인지에 대한 설명이 부족하고 명확하지 않게 기술되어 있다. 현재까지 알려져 있기는 반응수정계수는 초과강도와 연성을 고려할 수 있는 계수로 알려져 있는데 부록에서 설명은 어떤 것을 k_D 에서 고려한 것인지 명확하지 않다.
- ④ ISO 3010 부록 A에서는 극한한계상태에 대한 지진하중으로 500년 재현주기의 지진을 제시하고 있고 사용한계상태에 대해서는 20년 지진을 제안하고 있다. 하지만 중저지진 지역인 우리 나라에서 20년 재현 주기의 지진이 어떤 의미를 갖는지 알 수 없다. ISO가 국제 기준이므로 강진지역의 여건 뿐 만 아니라 중저지진 지역 또한 고려해야 할 것이다.

- ⑤ 극한한계상태에 대한 지진을 500년 재현주기를 가진 지진으로 제안하고 있는데 이는 기존 대부분 국가에서 사용하는 지진하중이라 할 수 있다. 이는 극한한계상태라기 보다는 인명보호를 위한 한계상태에 대하여 정의된 하중이라 할 수 있다.
- ⑥ 우리 나라의 반응수정계수와 유사한 k_D 계수의 경우 연성능력과 건물의 초과강도를 기초로 얻을 수 있다. 이 계수는 지진하중이 긴 재현주기를 가지므로 건물이 탄성상태를 유지하도록 요구하는 하중 수준을 낮추어 설계지진 발생시 건물의 비탄성 거동을 허용하는 것이라 할 수 있다. 하지만 여기에서 문제점은 k_D 계수를 구하기 위해서는 목표가 되는 변위 연성비를 알아야 한다 (즉 구조물의 연성능력). 하지만 500년 재현 주기의 지진으로는 건물의 최종 연성능력까지 도달시킬 수 없다. 따라서 k_D 가 목표연성비를 기초로 정해지는 것이므로 이 개념을 사용하려면 극한한계상태의 지진하중을 더 높여야 할 것이고 이에 대한 성능수준을 정해야 할 것이다.

6. 감사의 글

이 논문은 한양대학교 교내연구비와 STRESS 지원으로 수행된 과제로 이에 감사를 표한다.

참고문헌

1. ISO(1998), "ISO 3010 Bases for design of structures - Seismic actions on structures, First edition (1988-07-01)
2. ISO(1998), "ISO/CD 3010 Bases for design of structures - Seismic actions on structures (Revision of ISO 3010:1998)
3. Yuji Ishiyama, "Revision of International Standard ISO 3010 Bases for Design of Structures- Seismic Actions on Structures," Proceeding of 12 th World Conference of Earthquake Engineering, Aucklandm NewZealand, Feb. 2000.
4. IAEE(1996), "Seismic Regulations a World List - 1996," International Association for Earthquake Engineering.