

# 개정된 일본 내진설계기준의 한계내력계산법의 소개

## Introduction of the Capacity Design Methodology in the Building Standard Law of Japan

전 대 한\* 노 필 성\*\*  
Jun, Dae Han Roh, Pil Sung

---

### ABSTRACT

This manuscript introduces the Capacity Design Methodology in the Building Standard Law of Japan revised at 2000, June. The Building Standard Law of Japan was revised into the performance-based design format following the trend of international. The structural performance was evaluated for two limiting states; soundness limit state and safety limit state. The design seismic forces were determined on taking into consideration (a)the properties of the planned building, (b)amplification by local surfaces geology, and (c)soil-structure interaction.

---

#### 1. 서론

지진 다발 지역인 일본의 내진설계법은 오랜 역사를 가지고 있으며, 그동안 많은 지진 피해를 경험하면서 초기의 내진설계법은 많은 개정이 이루어졌다. 1995년 발생한 효고현남부지진(일명 고베지진)을 계기로 일본의 내진설계법은 큰 변화를 모색하게 되었으며, 세계적 추세인 성능에 기초한 설계규범으로 개정하는 사회적 합의가 이루어지게 되어 약 20년 동안 적용되어온 신내진설계법(1981년 개정)을 개정하여, 새로운 건축기준법이 1998년 6월 공포되게 되었다. 이 후 관련 법령, 조례, 규칙 등의 개정이 이루어져 2000년 6월 1일부터 새로운 건축기준법을 골격으로 내진설계법이 시행되게 되었다.<sup>1-2)</sup>

본 논문에서는 새롭게 개정된 일본의 내진설계법의 주요 골격을 이루는 한계내력계산법을 소개하고, 국내 내진설계기준 개발의 참고자료로 활용하는 것이 목적이다.

#### 2. 성능설계법의 도입 배경

1998년 6월 12일 공포된 일본의 개정 건축기준법의 골격은 건축물에 요구되는 성능에 관한 설계 개념의 도입이라고 볼 수 있다. 구체적으로 신제품, 신기술 개발의 촉진, 해외 제품과 자재의 일본 시장 유입의 원활화를 도모하고, 설계의 자유도를 높이기 위하여 건축기준법을 근본적으로 개정하여 디자인, 구조방법, 재료의 선택 등을 자유롭게 하기 위해 현재의 시방서 형식의 건축기준법을 건축물에 요

---

\* 정회원, 동서대학교 건설공학부 부교수

\*\* 정회원, 동아대학교 건축학부 겸임교수

구되는 성능을 규정하는 방식으로 재구축 하는 것을 목표로 하고 있다.

건축기준법의 성능기준의 목적은 건축물에서 요구되는 각종 성능을 만족시킬 수만 있다면, 어떠한 재료나 시스템, 설계법, 검증법을 사용해도 무관하다는 것이다.

### 3. 한계내력계산법

#### 3.1 개요

한계내력계산법은 새로운 구조관계 규정(성능설계 규정)에서 구조성능을 검증하는 방법으로 적용될 수 있는 한가지 방법의 예라고 할 수 있다<sup>1-2)</sup>. 성능설계법의 구조 성능 검증방법으로 한계내력계산 외에도 건설대신의 고시에 따른 건축기준법시행령 제81조 2의 규정에 따라 검증할 수 있지만, 시각이력 해석 등을 필요로 하기 때문에 여러 가지 어려움이 따른다. 따라서, 초고층 건축물을 제외한 중,소 규모의 건축물에서는 일반적으로 한계내력계산이 일반화 될 것을 염두에 두고, 한계내력계산법을 제시하고 있다.

#### 3.2 지진하중-지반의 증폭계수

성능평가를 위한 지진하중은 '해방공학적이반'에서의 감쇠정수 5%시의 가속도응답스펙트럼으로 설정되어 있다. 설계응답스펙트럼은 다음과 같이 평가한다.

$$S_A(T) = G_s(T) \cdot (Z \cdot S_d(T))$$

$S_A(T)$ : 지진하중 평가용 가속도응답스펙트럼,  $G_s(T)$ : 표층지반 증폭계수  
 $Z$ : 지진지역계수(기존의 지역계수를 그대로 사용),  $S_d(T)$ : 표준 가속도응답스펙트럼,  
 $T$ : 건축물의 손상한계 고유주기 또는 안전한계 고유주기(sec)

표준 가속도응답스펙트럼( $S_d(T)$ )은 공학적 기반이라 일컫는 지하 깊은 곳의 비교적 경질의 지층면이 노출되었다고 보고, 그 지층면 위에 설정된 설계용 가속도 응답스펙트럼을 의미한다. 구체적으로 지반의 종류를 판별하는 하나의 지표로 활용되는 전단파속도가 약 400m/sec인 지반을 공학적 기반으로 본다. '해방공학적이반'에서 설계용 지진동을 설정한 것은 표층지반의 특성에 의존하지 않는 지진동을 설정하기 위한 것이다. '해방공학적이반'에서의 표준 가속도응답스펙트럼은 손상한계 검증용과 안전한계 검증용의 2 가지 가속도응답스펙트럼으로 설정된다.

표층지반의 가속도 증폭계수  $G_s$ 는 건축물의 고유주기에 따라 표 2와 같이 산정한다. 이 때 건축물의 손상한계시 및 안전한계시의 증폭계수  $G_s$ 가 표의 하한치 이하일 때는 하한치를 사용한다. 한편 건축물과 표층지반의 상호작용을 고려하여 상호작용에 관한 계수를 곱하여 사용할 수 있다.

(1) 표층지반의 1차 탁월주기 및 2차 탁월주기는 다음 식으로 계산된다.

$$T_1 = \frac{4(\sum H_i)^2}{\sum \left( \sqrt{\frac{G_i}{\rho_i}} \cdot H_i \right)}, \quad T_2 = \frac{T_1}{3}$$

$H_i$ : 지반조사에 의한 각 지층의 두께(m),

$G_i$ : 지진시 각 지층의 전단강성을 나타내는 지표,  $\rho_i$ : 지반조사에 의한 각 지층의 밀도( $t/m^3$ )

표 2 표층지반의 증폭계수

건물의 고유주기에 따른 분류	지반 증폭계수 $G_s$	손상한계시의 하한치	안전한계시의 하한치
$T < 0.8T_2$	$G_s = G_2 \frac{T}{0.8T_2}$	1.5	1.2
$0.8T_2 < T \leq 0.8T_1$	$G_s = \frac{G_{s1} - G_2}{0.8(T_1 - T_2)} T + G_2 - 0.8 \frac{G_{s1} - G_2}{0.8(T_1 - T_2)} T_2$	1.5	1.2
$0.8T_1 < T \leq 1.2T_1$	$G_s = G_{s1}$	1.5	1.2
$1.28T_1 < T$	$G_s = \frac{G_{s1} - 1}{\frac{1}{1.2T_1} - 0.1} \cdot \frac{1}{T} + G_{s1} - \frac{G_{s1} - 1}{\frac{1}{1.2T_1} - 0.1} \cdot \frac{1}{1.2T_1}$	1.35	1.0

$T_1$  : 표층지반의 1차 탁월주기,

$T_2$  : 표층지반의 2차 탁월주기

$G_{s1}$  : 표층지반의 1차 탁월주기에 대한 증폭율,

$G_2$  : 표층지반의 2차 탁월주기에 대한 증폭율

(2) 표층지반의 1차 탁월주기에 대한 증폭 및 2차 탁월주기에 대한 증폭율

$$G_{s1} = \frac{1}{1.57h + a}, \quad G_2 = \frac{1}{4.71h + a}$$

$$a = \frac{\sum \left( \sqrt{\frac{G_i}{\rho_i}} H_i \right) \cdot \sum (\rho_i H_i)}{(\sum H_i)^2} \frac{1}{\rho_B V_B} \quad \text{: 파동 인피던스 비}$$

$h = 0.8 \frac{\sum (h_i w_i)}{\sum w_i}$  : 지진시 표층지반에 의한 에너지흡수 능력을 나타내는 값(0.05이하인 경우 0.05로 한다).

$\rho_B$  : 지반조사에 의해 구한 공학적 기반의 밀도( $t/m^3$ )

$V_B$  : 지반조사에 의해 구한 공학적 기반의 전단파 속도(m/sec)

$h_i$  : 지진시 표층지반의 각 지층의 감쇠정수를 나타내는 것으로 지진시 발생하는 표층지반의 전단변형도 및 토질에 따라 주어진 값.

$w_i$  : 지진시 표층지반의 각 지층의 최대 탄성변형도 에너지를 나타내는 것으로 다음 식으로 계산된 값.

$$w_i = \frac{G_i}{2H_i} (u_i - u_{i-1})^2$$

$u_i$  : 지진시 각 지층 최상부의 공학적 기반에 대한 상대변위(m)

(3) 건축물과 표층지반과의 상호작용에 관한 계수

$$\beta = \frac{K_{hb} \left\{ 1 - \left( 1 - \frac{1}{G_s} \right) \frac{D_e}{\sum H_i} \right\} + K_{he}}{K_{hb} + K_{he}} \eta$$

$K_{hb}$  : 지반조사에 의해 구한 건축물 지하부분 저면에서 수평 지반스프링 정수(kN/m)

$D_e$  : 지표면에서 기초 저면까지 거리(m)

$K_{he}$  : 지반조사에 의해 구한 건축물 지하부분 측면에서 수평 지반스프링 정수(kN/m)

$\eta$  : 손상한계 고유주기에서 연성효과에 의한 가속도 저감율.

다음 식에 의해 계산한 값(안전한계 고유주기에 관한 계산을 할 때는 1.0으로 한다)

$$\eta = \frac{1.5}{1 + 10h}$$

$$h = \frac{1}{\gamma^3} \left\{ h_{sw} \left( \frac{T_{sw}}{T_d} \right)^3 + h_{mv} \left( \frac{T_m}{T_d} \right)^3 + h_b \right\}$$

$h_{sw}$ : 지반조사에 의해 구한 지진시 수평 지반 점성감쇠정수(0.3초과 시는 0.3으로 한다)

$h_{mv}$ : 지반조사에 의해 구한 지진시 회전 지반 점성감쇠정수(0.15초과 시는 0.15로 한다)

$h_b$  : 건축물의 손상한계시 등가점성감쇠정수,  $T_{sw}$ : Sway 고유주기  
 $T_{ro}$  : Rocking 고유주기,  $T_d$  : 건축물의 손상한계 고유주기,  $r$  : 주기 조정계수

### 3.3 등가 점성감쇠

한계내력계산에서 지진시의 응답을 구하는 수법의 이론적인 배경은 등가 선형화법이다. 등가 선형화법은 등가인 탄성계의 주기와 감쇠특성으로 복잡한 탄소성계의 응답을 구하는 방법이다. 즉, 탄소성계의 이력감쇠를 탄성계의 등가인 점성감쇠로 치환하여 탄성해석으로부터 탄소성 응답을 예측하는 기법이다. 이와 같은 탄소성계의 점성감쇠( $h$ )를 평가하는 방법으로 여러 가지가 있지만 본 규정에서는 다음과 같은 방법을 제시하고 있다.

먼저 감쇠에 의한 진동의 가속도 저감을  $F_h$ 은 다음 식과 같이 계산한다.

$$F_h = \frac{1.5}{1+10h}$$

$h$ : 건축물의 감쇠특성을 나타내는 값으로서 아래와 같이 계산될 수 있다.

(1)구조부재의 감쇠특성으로부터 구하는 경우

$$h = \frac{\sum_{i=1}^N m h e_i \cdot m W_i}{\sum_{i=1}^N m W_i} + 0.05$$

$m h e_i$ : 건축물의 안전한계시 각 부재의 감쇠특성을 나타내는 수치

(2)소성변형능력을 나타내는 수치  $m D_f$ 가 1이상인 부재에 대하여  $m D_f$ 가 전부 동등한 경우에는 다음과 같이 계산된다.

$$h = r_1 \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{D_f}} \right) + 0.05$$

여기서,  $r_1$  : 복원력 특성의 형상에 따라 결정되는 계수

$$D_f = \frac{\Delta_s Q_d}{\Delta d Q_s} \text{ : 건축물의 소성율.}$$

### 3.4 손상한계시의 검증

손상한계는 건축물의 사용기간 중 최소한 한번 이상 일어날 수 있는 지진(중규모 지진)에 대하여 구조물의 안전성과 사용성, 내구성이 저하되지 않고, 보수, 보강이 필요하지 않는 한계를 말한다. 즉, 무손상의 한계 또는 보수, 보강을 요하지 않는 한계이다. 이것은 건축물을 구성하는 전 구조부재의 저항강도 및 에너지 흡수능력이 저하되지 않고, 또한 과도한 잔류변형과 잔류 균열이 생기지 않을 것을 요구한다. 따라서 손상한계 값으로서 각 층의 층간 변형각이 1/200(구조내력상 주요한 부분의 변형에 의해 손상이 발생할 염려가 없는 경우는 1/120) 이하가 되도록 규정하고 있다.

지진동 가속도에 의해 건축물 상부층의 각 층에 작용하는 수평력, 층간변위를 다음과 같이 계산하여, 수평력이 손상한계내력을 초과하지 않아야 하며, 또한 층간변형각이 1/200 이하인 것을 확인한다.

(1)손상한계 고유주기 산정

건축물의 임의의 층에 손상한계 변위가 발생할 때의 고유주기(Td)는 다음과 같이 산정한다.

$$T_d = 2\pi \sqrt{\frac{Mu_d \Delta d}{Qd}} : \text{손상한계 고유주기(sec)}$$

$$Mu_d : \text{건축물의 유효질량} = \frac{(\sum m_i \delta d_i)^2}{\sum m_i \delta d_i^2}, \quad \Delta d : \text{건축물의 대표 변위} = \frac{\sum m_i \delta d_i^2}{\sum m_i \delta d_i}$$

$\delta d_i$  : i층에 다음 식에 의해 계산된 건축물의 손상한계내력에 상당하는 수평력  $Pd_i$ (kN)가 작용할 때 생기는 기초에서 i층까지의 변위

$$Pd_i = \frac{Bd_i m_i}{\sum_{j=1}^N Bd_j m_j} Qd$$

$Qd$  : 건축물의 손상한계내력(kN). 각 층에 대하여 다음 식에 의해 계산된 손상한계내력의 1층 층전단력계수 환산치  $qd_i$  중 최소치에 건물의 전 중량을 곱하여 계산한다.

$$qd_i = \frac{Qd_i}{\frac{\sum_{j=1}^N Bd_j \cdot m_j}{\sum_{j=1}^N Bd_j \cdot m_j} \cdot \sum_{j=1}^N m_j \cdot g}, \quad Qd_i : i\text{층의 손상한계내력}$$

## (2) 손상한계시 층지진력 산정

각층의 지진력은 다음 식에 의해 산정한다.

$$Td < 0.16 \quad Pd_i = (0.64 + 6Td) \cdot m_i \cdot Bd_i \cdot Z \cdot G_s$$

$$0.16 \leq Td < 0.64 \quad Pd_i = 1.6 \cdot m_i \cdot Bd_i \cdot Z \cdot G_s$$

$$0.64 \leq Td \quad Pd_i = (1.024 \cdot m_i \cdot Bd_i \cdot Z \cdot G_s) / Td$$

$Bd_i$  : i층의 가속도 분포계수

건축물의 손상한계시 각 층의 변형분포를 기준으로 손상한계 고유주기에 따른 모드참여계수에 의해 계산한다.

## 3.5 안전한계시의 검증

안전한계는 건축물의 사용기간 중 극히 발생할 가능성이 낮은 대규모 지진에 대하여 건축물 내부 및 외부의 인명에 위험을 일으키지 않는 한계를 말한다. 기준법에서는 인명에 위험을 일으킬 수 있는 파괴로서 수직하중 지지부재의 수직하중 지지능력 상실, 제반의 안정성과 지지능력 상실에 따른 건축물의 전도와 부재의 탈락, 설비 기기 및 집기의 전도와 탈락, 이동 등을 포함한다. 안전한계의 검증방법은 임의의 층이 안전한계 변위에 도달했을 때의 건축물의 고유주기(안전한계 고유주기)를 고시에 정해진 방법으로 구하고, 이 값을 이용하여 각 층에 작용하는 지진력을 시행규칙에 나타난 방식에 따라 산정하여, 이 지진력이 보유 수평내력을 초과하지 않도록 확인하는 것이다. 다른 방법으로 등가 1자유도계의 내력곡선( $S_a - S_d$  곡선)과 상기의 시행규칙에서 산정된 응답스펙트럼의 교점을 지진력으로 보는 방법도 가능하다.

### (1) 손상한계 고유주기 산정

건축물의 임의의 층에 안전한계변위가 발생할 때의 고유주기( $T_s$ )는 다음과 같이 산정한다.

$$T_s = 2\pi \sqrt{\frac{Mu_s \Delta s}{Q_s}} : \text{안전한계 고유주기(sec)}$$

$$Mu_s : \text{건축물의 유효질량} = \frac{(\sum m_i \delta s_i)^2}{\sum m_i \delta s_i^2}, \quad \Delta_s : \text{건축물의 대표 변위} = \frac{\sum m_i \delta s_i^2}{\sum m_i \delta s_i}$$

$\delta s_i$  : i층에 다음 식에 의해 계산된 건축물의 안전한계내력에 상당하는 수평력  $P_{si}$ (kN)가 작용할 때 생기는 기초에서 i층까지의 변위

$$P_{si} = \frac{B_{si} m_i}{\sum_{j=1}^N B_{sj} m_j} Q_{si}$$

$Q_{si}$  : 건축물의 안전한계내력(kN). 각 층에 대하여 다음 식에 의해 계산된 손상한계내력의 1층 층전단력계수 환산치  $q_{di}$  중 최소치에 건물의 전 중량을 곱하여 계산한다.

$$q_{si} = \frac{Qu_i}{Fe_i \frac{\sum_{j=1}^N B_{sj} \cdot m_j}{\sum_{j=1}^N B_{sj} \cdot m_j} \sum_{j=1}^N m_j \cdot g}$$

$Qu_i$  : i층의 보유수평내력,

$Fe_i$  : 신내진설계법에 의한 i 층의  $Fe$  값

## (2) 안전한계시의 층지진력 산정

안전 한계시의 각층의 지진력은 다음 식에 의해 산정한다.

$$Ts < 0.16 \quad P_{si} = (3.2 + 30Ts) \cdot m_i \cdot B_{si} \cdot F_h \cdot Z \cdot G_s$$

$$0.16 \leq Ts < 0.64 \quad P_{si} = 8 \cdot m_i \cdot B_{si} \cdot F_h \cdot Z \cdot G_s$$

$$0.64 \leq Ts \quad P_{si} = (5.12 \cdot m_i \cdot B_{si} \cdot F_h \cdot Z \cdot G_s) / Ts$$

여기서,  $Ts$ : 안전한계 고유주기(초) =  $2\pi \sqrt{\frac{Mu_s \Delta_s}{Q_s}}$ ,  $P_{si}$ : 각 층에 작용하는 수평력(kN)

$B_{si}$ : i 층의 가속도 분포계수( $B_d$ 와 동일한 방법으로 산정),  $F_h$ : 안전한계 고유주기에서 감쇠에 의한 저감율

## 4. 결론

이상으로 2000년 6월 1일부터 시행된 일본 내진설계법의 한계내력계산법에 대하여 알아보았다. 일본의 내진설계법은 다른 나라의 설계법에 비하여 매우 복잡하다. 그 이유는 일본이 가지고 있는 내진 설계기술의 독창성과 일본에서 빈번히 발생하는 지진피해의 영향이라고 볼 수 있다. 이번에 개정된 건축기준법은 세계적 흐름인 성능에 기초한 성능설계법의 개념에 입각하여 개정되었다. 그러나 기존의 내진설계법의 기본적인 틀을 그대로 유지하면서 응답의 평가기준을 성능설계에 맞추는 형식으로 개정된 것으로 이해할 수 있다. 현재까지 허용응력도 설계법과 보유내력 설계법의 2단계로 나누어진 내진설계규정이 성능설계법으로 전환되면서 손상한계와 안전한계로 나누어 건축물의 성능을 평가하는 것이 주요한 개정 사항이다.

## 참고문헌

1. 전대한, "학술기사:일본의 개정 건축기준법과 한계내력계산법의 소개," 전산구조공학 제 14권 제4호, 2001.12, pp.23-29.
2. 전대한, 노필성, "일본의 내진설계법 및 내진성능 평가법의 소개," 한국지진공학회 2002년도 춘계 학술대회논문집, Vol.6 No.1, pp.341-348, 2002.
3. 山内泰之 외, "特輯-限界耐力計算の理解と活用," 建築技術, 2001년 4월.
4. NPO法人建築技術支援協會, "改正建築基準法-構造の性能規定化-を解く," 彰國社, 2001. 3.