

일본의 개정 건축기준법과 한계내력계산법의 소개

전 대 한

1. 서 론

지진 나발 지역인 일본의 내진설계법은 오랜 역사를 가지고 있다. 많은 지진 피해를 경험하면서 초기의 내진설계법은 수많은 개정이 이루어졌다. 그러나 일본의 내진설계법은 일본 고유의 지진발생 메카니즘, 건축구법, 사회, 문화적인 환경 등의 영향으로 일본만이 지닌 독특한 내진규정으로 인식되어, 오늘날 세계화 시대에 적극적으로 기여하지 못한 점이 일본 자체에서도 비판받고 있다.

1995년 발생한 효고현남부지진(일명 고베지진)의 계기로 일본의 내진설계법은 큰 변화를 모색하게 되었으며, 세계적 추세인 성능에 기초한 설계규범으로 개정하는 사회적 합의가 이루어지게 되었다. 이후 관련단체들의 지속적인 연구와 질차를 거쳐 새로운 건축기준법이 1998년 6월 12일 공포되게 되었다. 후속 조치로서 관련 법령, 조례, 규칙 등의 개정을 동반하여 2000년 6월 1일부터 새로운 건축기준법을 골격으로 내진설계법이 마련되어 시행에 이르게 되었다.

본 학술기사에서는 새롭게 개정된 일본의 건축기준법의 구조설계에 관한 규정을 중심으로 성능

설계법에 관한 내용의 배경과 목적을 알아보고, 내진설계법의 주요 골격을 이루는 한계내력 설계법의 개요를 간략히 소개하고자 한다.

2. 일본의 건축기준법과 성능설계법의 도입 배경

1998년 6월 12일 공포된 일본의 개정 건축기준법은 “건축확인 검사의 민간개방”, “건축규제 내용의 합리화”, “건축규제의 실효성의 확보” 라는 중요한 3가지 축을 기반으로 대폭적인 개정을 실시한 것으로 되어 있다. 개정법의 공포 후 관련되는 시행령, 시행규칙, 건설대신의 고시(건설교통부 장관의 조례에 해당) 등의 개정이 동시에 이루어져 2000년 6월 1일부터 전체적인 시행 규정이 마련되게 되었다. 이번에 개정된 건축기준법의 골격은 건축물에 요구되는 성능에 관한 설계 개념의 도입이라고 볼 수 있을 것이다. 구체적으로 신제품, 신기술 개발의 촉진, 해외 제품과 자재의 일본 시장 유입의 원활화를 도모하고, 설계의 자유도를 높이기 위하여 건축기준법을 근본적으로 개정하여 디자인, 구조방범, 재료의 선택 등을 자유롭게 하기 위해 현재의 지방서 형식의 건축기준법을 건축물에 요구

* 동서대학교 건설공학부, 조교수

되는 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. 구조분야에서 구조성능이란 외적 작용과 외적 조건 또는 이들의 변화에 대하여 구조체에 나타나는 능력 성장이라고 할 수 있다. 이러한 관점에서 구조설계와 관련된 성능으로서 여러 가지가 있겠지만, 우선 기능성(안전성, 신뢰성, 내구성, 쾌적성), 경제성(유지보존성, 시공성), 구조의 상징성(구조미, 구조감각) 등을 들 수 있다. 이들 성능에 관한 항목들에 대하여 현시점에서 적용할 수 있는 부분도 있지만, 경우에 따라서는 성능 평가가 불가능한 분야도 많이 있다.

여기서 성능설계에 대한 기술적인 문제를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 설계자는 건축구조물이 목표로 하는 구조에 관한 성능을 건축주와 사용자측의 요구를 감안하여 설계한다.
- (2) 설계하고자 하는 구조물의 특성과 주어진 여러 가지 조건에 따라 적절한 계산법을 선택하여 구조물을 가설계한다.
- (3) 가설계된 구조물이 (1)에서 설정된 목표성능을 보유하고 있는지를 확인한다(성능평가 : 보유

성능의 추정과 목표성능의 달성 확인).

- (4) 목표로 한 성능과 보유하고 있다고 평가된 성능을 건축주와 사용자측에 알기 쉽게 설명한다(성능표시).

이와 같이 성능설계란 목표로 하는 성능을 명확히 하여 그 성능을 만족하도록 설계와 평가를 수행하는 것이다. 여기서 목표성능을 달성하기 위한 계산법과 상세한 실차는 설계자의 판단과 선택에 맡기는 것이 기술자의 판단을 자유롭게 하고 자유도가 높은 구조설계가 가능하도록 하는 것이다. 성능표시의 한 예로서 표 1과 같이 지진하중에 대한 요구성능 매트릭스가 제시되어 있다.

새로운 건축기준법의 기본 체계는 성능항목은 건축기준법으로 명시하고, 성능기준은 시행령에 명시하며, 검증방법과 종래의 사양규준은 예시 사양으로 시행규칙과 건설대신 고시 형식으로 규정되어 있다. 즉, 화재시의 내화, 지진에 대한 구조안전 등을 성능항목으로 하여 건축법률로 정하고, 각각의 성능항목에 대응한 요구를 정하는 성능기준을 시행령에서 정하고, 성능기준에 대한 적합성을 판단하기 위한 검증방법 및 예시 사양은 시행규칙과 건설대신 고시로 규정하는 체계를 갖추고 있다.

구조관련 규정은 과거와 같이 “구조방법규정”(사양서 형식의 규정)과 성능기준에 입각한 검증방법으로서의 성격을 갖는 “구조계산규정”으로 구성

표 1 지진하중에 대한 요구성능 매트릭스

하중 크기	L1	L2	L3	L4	
재현기간	20년	100년	500년	1,000년	
50년간 초과확률	92%	39%	9.5%	4.9%	
주요 구조등급	A	무피해(변형제한)	무피해(변형제한)	계속사용가 (상시하중 지지부재 탄성변형 제한)	보수 후 사용가 (잔류 변형 제한)
	B	무피해(변형제한)	계속사용가 (상시하중 지지부재 탄성변형 제한)	보수 후 사용가 (잔류 변형 제한)	붕괴방지 (인명보호)
	C	계속사용가 (상시하중 지지부재 탄성변형 제한)	보수 후 사용가 (잔류 변형 제한)	붕괴방지 (인명보호)	
	D	보수 후 사용가 (잔류 변형 제한)	붕괴방지 (인명보호)		

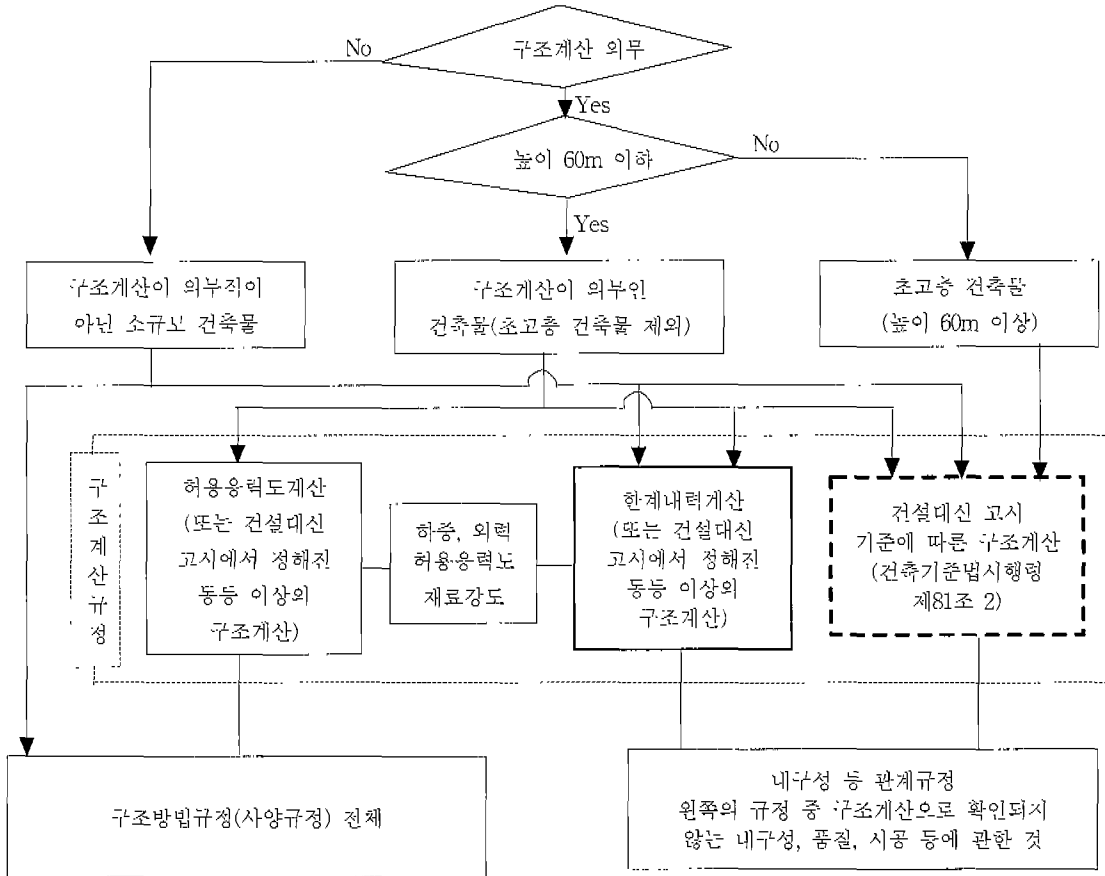


그림 1 새로운 구조관계 규정 적용에 관한 흐름도

되어 있어 과거의 건축기준법과 큰 차이는 없다. 과거의 구조규정은 기본적으로 소규모 건물에서는 사양규정만 적용되고, 그 외의 건축물에 대해서는 사양규정과 구조계산규정이 적용되도록 되어 있었다. 즉, 구조계산규정은 사양규정에 적합하다는 조건을 전제로 한 것이고, 구조계산규정만으로는 성능을 검증하는 방법으로서 완전한 것이라고 할 수 없었다. 따라서 새로운 건축법에서는 사양규정을 전제로 하지 않는 새로운 검증방법을 모색하는 방법으로 개정이 이루어졌다. 구체적으로는 “구조방범규정”이 “내구성 등 관계규정”과 “그 외의 규정”으로, “구조계산규정”이 “허용응력도 규정(종래의 구조계산)”, “한계내력계산”, “건축기준법시행령 제 81조 2의 계산”의 3가지 방법으로 나누어진다. 구조계산으로서 “한계내력계산” 또는 “건축기준법시행령 제81조 2의 계산”에 의한 경우에는 사양규정

중 내구성능규정만이 적용되는 것으로 된다. 즉, “한계내력계산”과 “건축기준법시행령 제81조 2의 계산”이 성능형의 검증방법으로서 적용된다. “내구성능 관계규정”은 “구조방범규정”중 예외적으로 구조계산으로 대체할 수 없는 “구조설계에 관한 기본 원칙”, “건축물의 품질 확보”, “내구성”, “시공성”, “방화성”에 관한 규정이다. “건축기준법시행령 제 81조 2의 계산”에서는 시가이력해석법을 기본으로 하는 해석방법이 규정되어 있지만, 이 방법에 따른 경우에는 고도한 기술적 판단이 필요하므로 건설대신의 인증이 필요하게 되어 있다. 새로운 구조관계 규정 적용에 관한 흐름도를 그림 1에 나타낸다.

3. 한계내력계산

앞에서 서술된 바와 같이 한계내력계산법은 세

로운 구조관계 규정(성능설계 규정)에서 구조성능을 검증하는 방법으로 적용될 수 있는 한가지 방법의 예라고 할 수 있다. 성능설계법의 구조 성능 검증방법으로 한계내력계산 외에도 건설대신의 고시에 따른 건축기준법시행령 제81조 2의 규정에 따라 검증할 수 있지만, 시각이력해석 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.

시행규칙과 건설대신 고시에 명시된 한계내력계산에서의 내진성능 검증 흐름을 그림 2에 나타낸다. 한계내력계산에서는 기본적으로 손상, 전도, 붕괴의 방지를 지진하중뿐만 아니라 풍하중, 설하중에 대해서도 직접 검증하도록 규정되어 있다. 적재하중에 대해서는 손상 방지를 검증하는 것만으로 전도와 붕괴에 대한 안전성은 자동적으로 확보된다고 보고 생각된다.

그림 3에는 지진하중에 대한 골조구조의 안전성 검증에 대하여 한계내력계산법에 의한 구체적인 검증 예를 나타낸 것이나.

우선 적용범위와 사용재료에 대한 확인이 필요하다. 한계내력계산은 원칙적으로 어떤 구조에 대해서도 적용할 수 있도록 되어 있다. 그러나 초고층 건축물(높이 60m 초과)에 대해서는 “내구성 등 관계규정”에 따르고, 또한 건축기준법시행령 제81조 2의 규정에 따라 건설대신이 인증하는 구조계산에 의하도록 되어 있다. 이 외에도 1차 모드가 지배적인 모드임을 보증할 수 있도록 유효질량비 규정에 대한 확인이 필요하녀, 또한 탄성범위가 매우 작으면서 극단적으로 큰 지진응답변형을 일으킬 수 있는 건축물에 적용하는 것은 응답변형이 지나치게 증가될 가능성이 있으므로 주의가 필요하다. 구조재료에 관해서는 허용응력도와 재료강도가 규정된 구조재료에 적용할 수 있으며, 규정에 없는 재료를 이용한 구조물(신재료, 면진구조, 제진구조 등)은 건설대신의 인증이 필요하다.

두 번째는 자중, 적재하중을 실제 상황에 맞게 산정 한다.

세 번째는 손상 한계시, 안전 한계시의 건축물 기초 저면에서의 가속도 응답스펙트럼 S_{a1} , S_{a2} 를

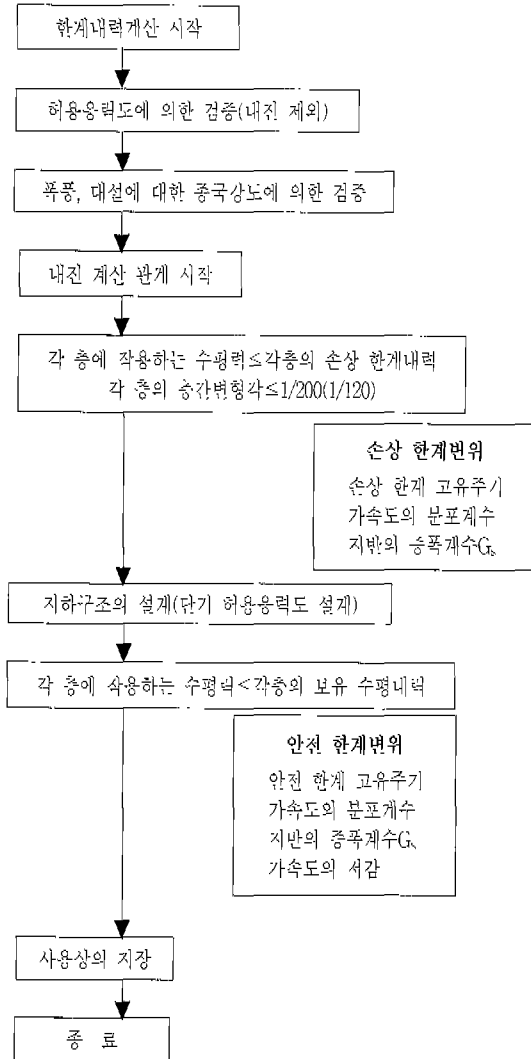


그림 2 한계내력계산에서의 내진성능 검증 흐름

산정한다. 이것은 한계내력계산법의 중요한 특징 중에 하나이다. 즉, 건축물의 기초 저면에서의 지진동에 대한 건축물의 응답스펙트럼을 공학적 기반 위치에서의 지진동(S_{a0})과 대상지역의 지진활동도(Z), 표층지반의 증폭특성(G_s)을 고려하여 산정한다.

네 번째인 건축물의 한층 변형 관계의 산정 및 변형에 따른 건물 감쇠의 산정도 한계내력계산법의 중요한 골자이다. 실제적으로는 수평외력 분포를 A_i 분포로 하여 하중증분분석으로 건축물의 하중-변형관계를 산정하여, 규정에 따라 1자유도

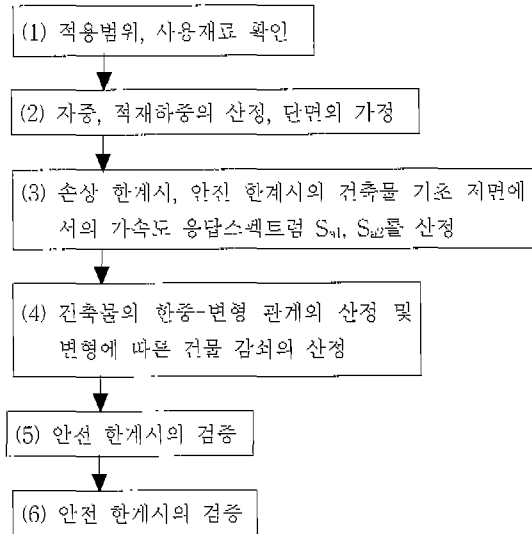


그림 3 한계내력계산의 흐름

계로 단순화한다. 손상 한계시의 감쇠는 등가점상감쇠 값으로 5%로 한다. 안전 한계시는 변형의 정도에 따라 이력감쇠를 등가점성감쇠로 취급한다.

다섯 번째 손상한계시의 검증은 손상한계내력(Qd)일 때의 주기를 산정하여 지표면에서의 가속도응답 스펙트럼으로부터 대응하는 주기의 가속도 Sa1을 얻는다. Qd가 Sa1 · Md(손상한계시의 유효질량)을 상회하는 것을 확인한다. 또한 각층의 층간변위가 1/200 이하가 되도록 확인한다.

여섯 번째 안전한계시의 검증은 우선 최초의 안전한계 변위를 설정하여(보통 최대 층간변위가 1/100-1/30 일 때 건물의 대표변형으로 한다), 그 때 1층의 전단력 Q1을 Qs(안전한계 내력)로서 구한다. 설정한 안전한계 변위시의 주기를 산정하여, 지표면에서의 가속도 응답 스펙트럼으로부터 대응하는 주기의 가속도 Sa2를 안전한계 변위에 따라 지가한 Sa2 · Fh를 얻는다. Qs가 Sa2 · Fh · Ms(안전 한계시의 유효질량)을 상회하는가를 확인한다. 이 방법에서 중요한 점은 설정한 안전한계 변위시의 각 부재의 응력, 변형이 부재의 내력, 한계변형을 상회하지 않아야 하고, 또한 설정한 안전한계 변위시의 각 부재의 응력, 변형을 보증하고 있다는 것을 확인하는 것이다.

4. 한계내력계산에서 각 항목의 해설

4.1 지진하중

성능평가를 위한 지진하중은 “해방공학적 기반”에 서의 감쇠정수 5%시의 가속도응답스펙트럼으로 설정되어 있다. 설계응답스펙트럼은 다음과 같이 평가한다.

$$S_A(T) = G_s(T) \cdot \{Z \cdot S_0(T)\}$$

여기서,

S_A(T) : 평가용 가속도 응답스펙트럼

G_s(T) : 표층지반 증폭계수

Z : 지진지역계수

S₀(T) : 표준 가속도 응답스펙트럼

T : 주기(sec)

표준 가속도 응답스펙트럼(S₀(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. “해방공학적 기반”에서 설계용 지진동을 설정한 것은 표층지반의 특성에 의존하지 않는 지진동을 설정하기 위한 것이다. 해방공학적 기반에서의 표준 가속도 응답스펙트럼은 손상한계 검증용과 안전한계 검증용의 2가지 가속도 응답스펙트럼으로 설정된다.

4.2 등가 1자유도계

성능설계법의 성능평가의 방법으로 건축물 전체의 구조복성을 나타내는 하중-변형곡선(구조성능 곡선)과 설정된 지진동에 대한 건축물의 소성변형량에 따라 등가 점성감쇠를 고려하여 얻어진 응답스펙트럼(요구성능 곡선)을 이용하여, 건축물의 최대 응답을 추정한다. 그러므로 구조성능 곡선은 응답스펙트럼과 직접 비교되기 때문에 반드시 1자유도계로 표현될 필요가 있다. 따라서 고층의 건축물의 응답을 어떻게 1자유도계로 표현할 것인가가 문제

이다. 등가 1자유도계 축약에 관한 이론적 내용은 참고문헌^{1),2)} 등을 참조할 수 있다.

4.3 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 규정에 서는 다음 식과 같은 방법을 제시하고 있다.

$$h = \gamma \left(1 - \frac{1}{\sqrt{\mu}} \right)$$

여기서,

γ : 복원력 특성의 형상에 따라 결정되는 계수
 μ : 소성율

4.4 한계상태와 한계변형

손상한계는 건축물의 사용기간 중 최소한 1번 이상 일어날 수 있는 지진(중규모 지진)에 대하여 구조물의 안전성과 사용성, 내구성이 저하되지 않고, 보수, 보강이 필요하지 않는 한계를 말한다. 즉, 무 손상의 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.

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 지지

능력 상실, 지반의 안정성과 지지능력 상실에 따른 건축물의 진도와 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(Sa-Sd 곡선)과 상기의 시행규칙에서 산정된 응답스펙트럼의 교점을 지진력으로 보는 방법도 가능하다.

4.5 지진력의 산정

4.5.1 손상한계시의 수평 지진력 산정

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

각층의 지진력은 다음 식에 의해 산정한다.

$$\begin{aligned} T_d < 0.16 & \quad P_d = (0.64 + 6T_d) \cdot m_i \cdot B_d \cdot Z \cdot G_s \\ 0.16 \leq T_d < 0.64 & \quad P_d = 1.6 \cdot m_i \cdot B_d \cdot Z \cdot G_s \\ 0.64 \leq T_d & \quad P_d = (1.024 \cdot m_i \cdot B_d \cdot Z \cdot G_s) / T_d \end{aligned}$$

여기서,

$$T_d : \text{손상한계 고유주기(초)} = 2\pi \sqrt{\frac{M_u A}{Q}}$$

P_d : 각 층에 작용하는 수평력(kN)

m_i : 각 층의 질량

B_d : 각 층의 가속도 분포계수

Z : 지역계수

G_s : 지반증폭 계수

$$M_u : \text{건축물의 유효질량} = \frac{(\sum m_i \delta_i)^2}{\sum m_i \delta_i^2}$$

$$A : \text{건축물의 대표 변위} = \frac{\sum m_i \delta_i^2}{\sum m_i \delta_i}$$

δ_i : 각층의 손상한계시 변위

4.5.2 안전한계시의 수평 지진력 산정

안전 한계시의 각층의 지진력은 다음 식에 의해

산정한다.

$$\begin{aligned} Ts < 0.16 & \quad P_s = (3.2 + 30Ts) \cdot m \cdot B_s \cdot F_h \cdot Z \cdot G_s \\ 0.16 \leq Ts < 0.64 & \quad P_s = 8 \cdot m \cdot B_s \cdot F_h \cdot Z \cdot G_s \\ 0.64 \leq Ts & \quad P_s = (5.12 \cdot m \cdot B_s \cdot F_h \cdot Z \cdot G_s) / Ts \end{aligned}$$

여기서,

$$Ts : \text{안전한계 고유주기(초)} = 2\pi \sqrt{\frac{M_w \Delta}{Q}}$$

P_s : 각 층에 작용하는 수평력(kN)

m : 각 층의 질량

B_s : 각 층의 가속도 분포계수

Z : 지역계수

F_h : 안전한계 고유주기에서 감쇠에 의한 지감율

G_s : 지반증폭 계수

$$M_w : \text{건축물의 유효질량} = \frac{(\sum m_i \delta_i)^2}{\sum m_i \delta_i^2}$$

$$\Delta : \text{건축물의 대표 변위} = \frac{\sum m_i \delta_i^2}{\sum m_i \delta_i}$$

δ_i : 각층의 안전한계시 변위

6. 결 론

이상으로 2000년 6월 1일부터 시행된 일본의 건축기준법과 한계내력계산법에 대하여 알아보았다. 일본의 내진설계법은 다른 나라의 설계법에 비하여 매우 복잡하고, 그 내용을 이해하기 어려운 점

이 많은 것이 솔직한 심정이다. 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 모유내력 설계법의 2단계로 나누어진 내진설계규정이 성능설계법으로 전환되면서 손상한계와 안전한계로 나누어 건축물의 성능을 평가하는 것이 주요한 개정 사항이라 보아진다.

지면 관계상 한계내력계산법에 적용되는 각 변수들의 구체적인 계산법이나, 적용방법을 모두 언급할 수 없어 독자들이 이해하는데 어려움이 따를 것으로 생각합니다. 양해해 주시길 바랍니다.

참 고 문 헌

1. Clough, R. W. and Penzien, J, Dynamic of Structures, McGraw-Hill, New York, 1975
2. Chopra, A. K., Dynamics of Structures-Theory and Applications to Earthquake Engineering, Prentice-Hall, New Jersey, 2001
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 4월호 [R]