

# 일본의 기존 철근콘크리트건물의 내진성능 및 지진피해율의 평가

## Estimation of Seismic Performance and Earthquake Damage Ratio of Existing Reinforced Concrete Buildings in Japan

이 강 석\*      이 리 형\*\*  
Lee, Kang-Seok      Lee, Li-Hyung

### 요 지

본 연구는 해외각국의 RC건물의 내진화기술 가운데, 일본의 기존 RC건물에 대한 내진성능의 평가수법인 내진진단기준의 현황을 소개함과 동시에 그 적용사례 및 지진대책에의 활용가능성을 분석·검토하여, 향후 한국실정에 맞는 RC건물의 내진화기술의 개발에 기초적인 자료로서 활용하고자 하는 것이 주목적이다. 이를 위해 본 연구에서는 일본의 東京都에서 최근 실시되어진 지진경험이 없는 RC건물의 내진성능을 내진진단기준에 의한 진단결과인 구조내진지표( $I_s$ )치를 중심으로 통계학적으로 분석하여, 이미 조사되어진 타 지역의 내진성능과 비교·검토하였고, 또한 확률론에 입각하여 대상지역의  $I_s$ 치의 분포특성과 이미 지진 피해를 받은 지역 건물의  $I_s$ 치 분포특성을 비교·검토하여 지진피해율을 추정하였다. 본 연구의 결과는 지진에 대한 보강건물의 효율적인 선정 등, 지진대책에 기본적인 자료로서 활용이 가능하며, 또한 일본의 내진성능 평가방법, 통계학적인 분석방법, 확률론에 입각한 지진피해율 평가방법 등의 방법론은 향후 한국의 RC건물에 대한 내진화기술의 개발에 활용이 가능하다고 사료된다.

**핵심어 :** 철근콘크리트건물, 내진성능, 내진진단기준, 구조내진지표( $I_s$ ), 확률론, 지진피해율

### Abstract

The main objective of this paper is to apply as the basic data for development of a methodology to discuss the future earthquake preparedness measures in Korea by investigating the concept and applicabilities of the Japanese Standard for Evaluation of Seismic Performance of Existing RC Buildings developed in Japan among the methodologies of all the countries of the world. This paper describes the seismic performance,  $I_s$ -index, of existing RC buildings in Tokyo, Japan evaluated by the Japanese Standard, also the relationships between  $I_s$ -index distribution of existing RC buildings in Tokyo and that of Shizuoka and Chiba Prefecture reported already in reference[4][5][6] are investigated. And from the comparison with  $I_s$ -index to buildings damaged by earthquakes experienced in Japan, the damage ratio due to severe earthquake of 3 districts mentioned above is estimated based on the probabilistic point of view. The results of this study can be utilized to identify urgently required earthquake preparedness measures with highest priority in existing RC buildings, and the methodology to evaluate the seismic performance of existing RC buildings in Japan, statistics analysis method and the methodology to estimate earthquake damage ratio based on the probabilistic point of view shown in this study can be recommended to develop a methodology to discuss the future earthquake preparedness measures in Korea.

**Keywords :** homogenization method, equivalent elastic constants, finite element formulation, composite material

\* 日本 東京大學 生産技術研究所 研究機關研究員, 工學博士  
\*\* 정희원, 한양대학교 건축공학과 교수, 공학박사

\* 이 논문에 대한 토론을 2000년 6월 30일까지 본 학회에 보내주시면 2000년 9월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

## 1. 서론

한국은 지금까지 지진피해의 경험이 적은 나라로서 인식되어왔다. 그러나, 최근 한국에서도 서해 및 동해안 등을 중심으로 중·소규모의 지진이 빈발하고 있으며, 역사지진 및 계기지진에 관한 연구결과[1]에 따르면 각종 건축구조물에 상당한 피해를 줄 수 있는 정도의 지진이 발생할 가능성이 있으며, 근 장래에 발생가능한 대규모의 지진에 대한 대책의 중요성이 점차 고조되어지고 있다. 특히, 최근의 세계각지에서 발생한 대지진, 예를 들면 1990년 이란지진(M=7.0~7.5, 사망자: 약3만명), 1990년의 필리핀지진(M=7.7, 사망자: 약2500명), 1992년의 이집트카이로지진(M=5.8, 사망자: 약500명), 1994년의 미국노스리지(Northridge)지진(M=6.7, 사망자: 약60명), 1995년의 일본효코켄남부지진(이하, 兵庫縣南部地震)(M=7.2, 사망자: 약6000명) 등의 발생은, 건축물의 내진성능 향상 등 지진대책의 중요성을 보다 크게 인식시키는 계기가 되었고, 한국의 자연환경이나 사회·경제적 특성을 반영한 건축물의 내진성능 평가수법, 지진피해예측에 근거한 보강건물의 합리적인 선정방법, 내진보강 방법 등 내진화기술의 개발이 시급한 실정이다.

본 연구는 향후 한국실정에 맞는 RC건물의 내진화기술 개발에 기초적인 자료로서 활용하고자 하는 것을 주목적으로, 해외각국에서 오랜 연구와 경험을 토대로 개발·정착되어진 철근콘크리트(이하, RC) 건물의 내진화기술 가운데, 1923년 관동(關東)대지진을 비롯한 수많은 지진피해를 경험하면서 개발·정착되어진 일본의 기존 RC건물에 대한 내진성능 평가법인 내진진단수법의 현황, 적용사례 및 적용가능성을 파악하여 지진대책에의 활용가능성을 통계·확률이론에 입각하여 분석·검토하였다. 따라서 상기 한국의 RC건물의 내진화기술의 개발에는 본 연구의 검토결과보다는 검토에 적용되어진 연구방법론, 즉 일본의 내진성능 평가수법, 내진성능의 통계학적인 분석방법, 확률론에 입각한 지진피해율의 평가방법 등이 기초적인 자료로서 활용가능 할 것이다.

## 2. 연구방법 및 절차

일본에서는 RC건물에 거대한 피해가 발생한 1968

년 토카치오키지진(이하, 十勝沖地震)[2]이후, 내진규정을 재평가해, 새로운 내진규정의 모색을 주목적으로 한 종합연구 프로젝트가 발족됨과 동시에 각종 내진진단기법이 제안되었으며, 1977년에 그러한 연구성과를 통일한 "내진진단규준[3]"이 발표되었다. 이 기준은 지금까지 상당수의 건물에 적용되었으며, 특히 시즈오카켄(이하, 静岡縣)[4][5] 및 치바켄(이하, 千葉縣)[6] 등에서는, 근 장래지진에 대비한 지진대책의 일환으로 지진경험이 없는 학교·병원·청사 등의 각종 공공건축물을 대상으로 내진진단이 실행되었고, 내진성능에 문제가 있는 건물에 대해서는 보강도 실시되고 있다.

본 연구에서는 첫째, 일본의 기존 RC건물에 대한 내진성능의 평가수법인 내진진단규준의 개요를 소개함과 동시에 과거의 지진을 경험한 RC건물을 대상으로 동 규준을 적용하여 평가한 내진진단결과인 구조내진지표(이하,  $I_S$ )치와 지진피해와의 관계를 고찰하여 내진진단결과의 적용가능성에 관하여 검토하였다. 둘째, 일본의 東京都에서 최근 실시되어진 지진경험이 없는 RC건물의 내진성능을 내진진단규준에 의한 진단결과인  $I_S$ 치를 중심으로 통계학적으로 분석하여, 이미 조사되어진 타 지역의 내진성능과 비교·검토하였다. 셋째, 대상지역의 내진성능( $I_S$ 치)의 분포특성과 이미 지진 피해를 받은 건물의  $I_S$ 치 분포특성을 비교·검토하여 확률론에 입각한 지진피해율의 평가에 관하여 검토하였다.

## 3. 일본의 내진진단수법의 개요 및 지진피해와의 관계

### 3.1 일본의 내진진단수법의 개요

내진진단규준은, 기존 중·저층 RC건물의 내진성능을 약산에 의해 평가를 하는 수법으로서, 약산의 수준이 다른 3단계의 내진진단법, 즉 제1차진단법, 제2차진단법 및 제3차진단법의 3종으로 구성되어 있다. 구조부분의 내진성능은 다음과 같이 정의되는 구조내진지표치 즉  $I_S$ 치로 나타낸다.

$$I_S = E_o \cdot S_D \cdot T \quad (1)$$

여기에서,  $E_o$ =보유성능기본지표( $C \times F$ )( $C$ =강

도지표,  $F$  =인성지표)

$S_D$  =형상(形狀)지표,  $T$  =경년(經年)지표

그 가운데, 보유성능기본지표( $E_o$ )가 가장 기본적인 내진성능을 나타내는 지표이며, 건물이 보유하는 내력을 전단력계수의 형식으로 나타내는 강도지표( $C$ )와 변형능력을 나타내는 인성지표( $F$ )의 곱으로 산정하는 것을 원칙으로 하고 있다. 이것은 건물이 지진을 받았을 때 안전하기 위해서는 벽이 많은 건물에서는 인성이 작기 때문에 상당한 강도가 필요하고, 또한 벽이 적은 건물(라멘구조)에서는 강도의 여유가 적기 때문에 인성이 있는 구조여야만 한다는 것을 고려한 것으로서, 벽이 많은 건물과 라멘구조의 건물에 공통의 내진성능의 척도를 설정하기 위한 목적으로 정한 것이다. 그리고,  $S_D$  및  $T$ 는 각각 건물의 정형성(整形性), 건설후의 연수에 따라  $E_o$ 지표를 보정하는 1.0을 기준치로 한 계수이다.

각 단계별의 진단법의 개요(상세는 문헌[3]참조)는 다음과 같지만, 진단법의 차수가 높을수록 산정법은 상세하게 되며, 그것에 따른 결과의 신뢰성이 높아지는 성질을 가지고 있다.

1) 제1차진단법 :  $E_o$ 지표는, 건물의 벽비율(벽단면적/바닥면적의 합계)과 기둥비율(기둥단면적/바닥면적의 합계)에 의하여 산정하며, 또한  $S_D$ 지표 및  $T$ 지표도,  $E_o$ 지표약산법의 수준에 맞춘 간편법에 의하여 산정한다. 본 진단법은 벽이 적은 건물에 적용시키면,  $E_o$ 지표가 과소평가되는 경향이 있다.

2) 제2차진단법 :  $E_o$ 지표는, 보의 강도는 충분히 크다고 가정하여, 기둥 및 벽의 종곡강도, 파괴형식 및 인성능력 등으로부터 산정한다.  $S_D$ 지표 및  $T$ 지표에 관해서는, 제1차진단법보다 상세한 평가법을 적용한다. 본 진단법은, 연직부재의 강도 이외에 인성능력도  $E_o$ 지표에 반영되기 때문에 인성이 풍부한 라멘구조로 구성된 건물 등에서는, 제1차진단법보다  $E_o$ 지표가 크게되는 경향이 있다. 본 연구에서는 주로 제2차진단법에 의한 결과를 이용하여 분석·검토한 것이다.

3) 제3차진단법 :  $E_o$ 지표는 골조의 항복형, 벽의 기초회전 등도 고려하여 산정하지만,  $S_D$ 지표 및  $T$ 지표는 제2차진단법과 동등하게 산정한다. 건물의 특성이 제2차진단법보다 상세하게 검토되며, 그 결과의 신뢰성은 높아진다.

위의 1)~3)법을 이용하면, 개개의 건물의 내진성능이 점수( $I_S$ 치)로 표시되어지며, 그  $I_S$ 치가 높으면 높을수록 내진성능이 우수하다는 것을 나타낸다. 이 진단수법은 일본에서 지금까지 명확한 판단기준이 없었던 건물의 내진성능을 건물의 내력과 변형성능에 의한 에너지흡수능력으로 점수화하여, 그 우열을 점수의 대소로 평가한다는 내진성능의 정량화를 시도한 점이 특징이다.

### 3.2 구조내진지표( $I_S$ )치와 지진피해와의 관계

그림1에 일본의 과거의 피해지진, 즉 1968년 十勝沖地震[2], 1978년 미야기켄오키지진(이하, 宮城縣沖地震[7], 1978년 이즈오시마카이지진(이하, 伊豆大島近海地震)[8] 및 1995년 兵庫縣南部地震[9]에 의하여 피해를 받은 RC건물을 대상으로 내진진단기준에 의한 제1차 및 제2차내진진단의 결과( $I_S$ 치)와 지진피해 정도와의 관계를 나타내었다. 동그림은 문헌[5]의 연구결과(1968년 十勝沖地震, 1978년 宮城縣沖地震 및 1978년 伊豆大島近海地震의 지진피해의 정도 및 내진진단의 결과)에 1995년 兵庫縣南部地震에서 피해를 입은 아와지시마(淡路島)의 RC건물을 대상으로 실시한 내진진단의 결과를 가필한 것이다.

그림1로부터 다음과 같은 지적이 가능하다.

1) 제1차 및 제2차내진진단의 결과인  $I_S$ 치와 지진피해의 정도에는 상관관계를 나타내고 있으며, 제2차내진진단에서는  $I_S$ 치가 약 0.6이상이면 중파이상의 큰 피해를 받은 건물은 없고, 0.6이하이면 큰 피해를 받은 건물이 급격히 증가함을 알 수 있다. 제1차내진진단에서 상기의 경향은 제2차내진진단의 경우보다 약간 크고 약  $I_S=0.8$ 정도를 나타내고 있다.

2)  $I_S$ 치가 0.6 및 0.8이하일지라도 전부 피해를

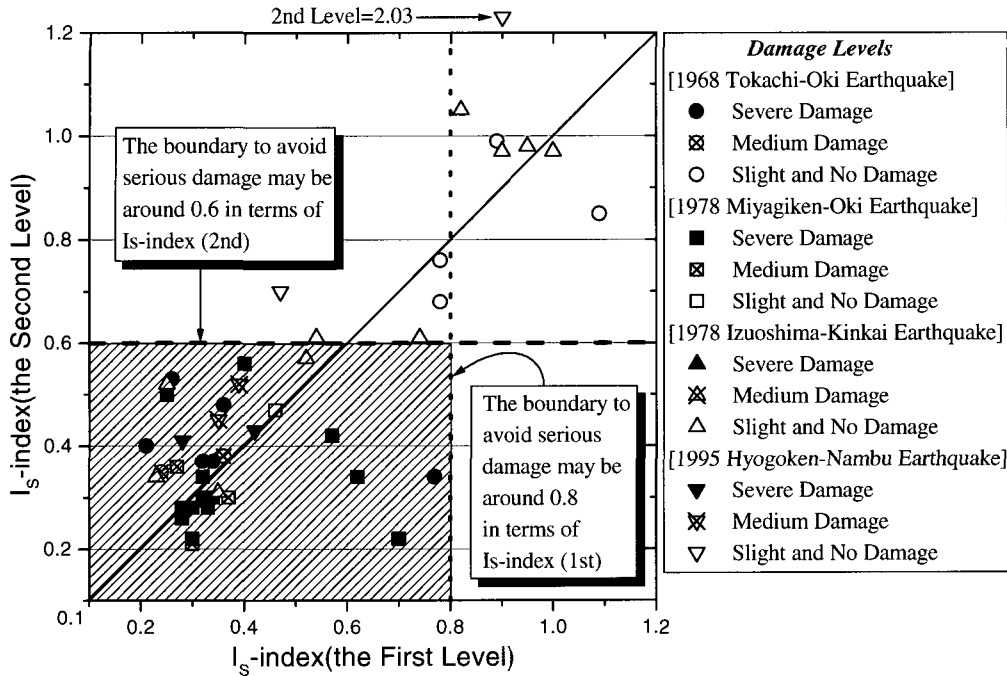


그림 1 제1차 및 제2차내진진단의 결과( $I_s$ 치)와 지진피해의 정도와의 관계

받는다고는 할 수 없고,  $I_s$ 치가 작으면 작을수록 지진피해를 받기 쉽다고 해석하는 것이 타당하다고 사료된다. 이것은 건물의 지반상황에 따른 입력지진동의 차이, 재료강도 및 시공정도 등의 불확정적인 요인이 깊게 관련되어져 있기 때문이라고 추정된다.

#### 4. 기존철근콘크리트건물의 내진성능의 분석

##### 4.1 대상건물 및 조사항목

대상건물은 東京都에 현존하는 지진경험이 없는 RC공공건물 168동이다. 조사항목은 건물용도·층수·건축연도·구조형식·내진진단결과 등이다. 한편, 본 조사에서 대상으로 한 건물에는 1981년 이후의 新耐震設計法(일본의 현행설계법)[10]에 의한 건물이 6동 있지만, 이것은 新耐震設計法の 이전에 건설되어진 건물의 증축된 부분으로서, 그 증축부와의 사이는 신축이음(expansion joint)이기 때문에, 본 조사에서는 별도의 건물로서 내진진단이 실시되었다.

#### 4.2 내진성능의 검토

##### 4.2.1 용도·층수 및 건축연도

그림 2 및 그림 3에 대상건물168동의 용도·층수 및 건축연도의 빈도분포를 나타내었다. 전 건물의 약80%가 2~4층으로, 경찰·소방서가 52동, 학교·학교체육관이 56동, 주택이 26동, 사무소가 20동등이고, 전체의 42%가 1971년 建築基準法施行令[11]의 개정 전에 건설되어진 건물이다.

##### 4.2.2 대상건물의 구조형식

그림 4에 대상건물의 1층의 벽비율(벽단면적/바닥면적의 합계)과 평균전단응력도와의 관계를 나타내었다. 그림 4는 이른바 시가(志賀) Map[12]에 대상건물의 데이터를 나타낸 것이다.

구조형식은 순라멘구조 또는 그것에 가까운 것으로부터 벽체로 구성되어 있는 것까지 폭넓게 분포되어 있다. 그림중의 일점쇄선은,  $A_w/\sum A_f < 30 (cm^2/m^2)$  또는  $1000 \sum A_f / (A_c + A_w) > 12 (kg/cm^2)$ 의 영역

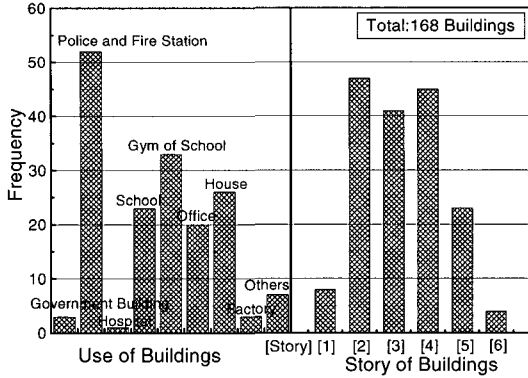


그림 2 대상건물의 용도 및 층수의 분포

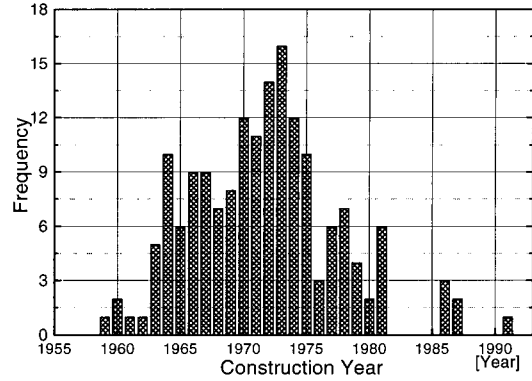


그림 3 대상건물의 건축연도의 분포

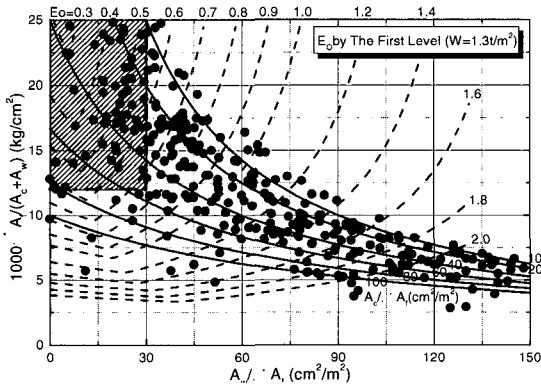


그림 4 대상건물의 1층의 벽면적(벽단면적/바닥면적의 합계)과 평균전단응력도와의 관계

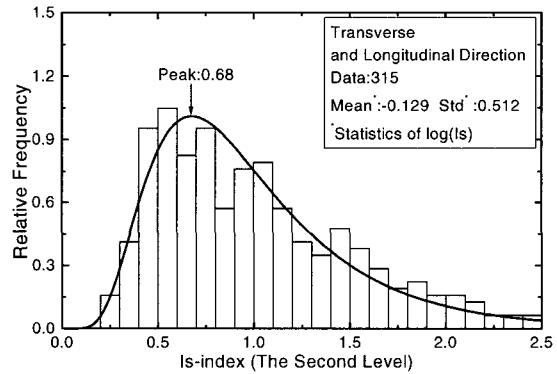


그림 5 대상건물의  $I_s$ 值的 분포

(1968년 十勝沖地震 및 1978년 宮城縣沖地震에서 중과이상의 큰 피해를 받은 건물이 포함되어져 있는 위험영역(12)을, 파선은 단위바닥면적당의 중량을  $1.3t/m^2$ 으로 했을 때의 제1차진단에 의한  $E_0$ 치와 시가(志賀)Map와의 관계를 나타낸 것이다. 상기의 위험영역에 포함되는 건물은 전체의 약18%이다.

#### 4.2.3 대상건물의 $I_s$ 치의 분포

그림 5에 대상건물의 제2차진단에 의한 1층(장변 및 단변방향)의  $I_s$ 치의 분포를 나타내었다. 여기에서는  $I_s$ 치가 2.5미만인 것만 표시한 것으로 이것은, ①  $I_s$ 치가 극단적으로 높은 것은 제3.2절에서 기술한 것처럼 지진피해가 생길 가능성이 거의 없다

는 사실, ②2.5미만에 전 데이터의 95%이상 포함되어져 있다는 사실을 고려해서 주관적으로 결정한 것이다. 후술의 데이터 분석에서도  $I_s$ 치가 2.5미만인 것만 취급했다.

그림 5의 곡선은, 빈도분포의 근사곡선으로 일반적으로 사용하고 있는 (1)정규분포(normal distribution), (2)대수정규분포(logarithmic normal distribution), (3)I형극치분포(type I extreme-value distribution), (4)III형극치분포(type III extreme-value distribution) 중에서 최우법(method of maximum likelihood)에 의하여, 가장 최적분포로 판단되어진 대수정규분포곡선으로 근사시킨 것이다 [부록1참조]. 그  $I_s$ 치의 분포는, 0.7부근에 피크를 가지는 식(2)와 같은 대수정규분포곡선으로 근사가

가능하고, 내진성능에는 건물에 따라 큰 차이가 있는 사실을 알 수 있다.

$$P_b(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\xi}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln x - \lambda}{\xi}\right)^2\right] \quad (2)$$

( $x = I_S$ 치,  $\lambda = -0.129$ ,  $\xi = 0.512$ )

#### 4.2.4 건축연도별의 $I_S$ 치의 분포

그림 6에 1971년의 建築基準法施行令[11]의 개정전후에 대한 제2차내진진단의 1층(장변 및 단변방향)의  $I_S$ 치분포의 변화를 나타내었다. 동법의 개정전은  $I_S$ 치가 0.4~0.6정도의 건물이 가장 많은

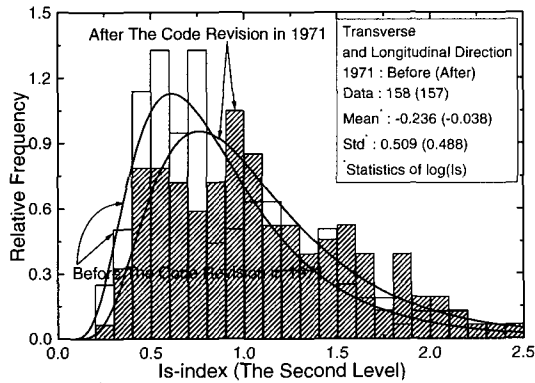


그림 6 건축연도별의  $I_S$ 치의 분포

것에 대하여, 개정후는 0.6이하의 건물은 적게 분포되어있다.

이것에 대해서는 제3.2절에 서술한 것처럼,  $I_S$ 치가 0.6이하의 건물은 1968년 十勝沖地震 및 1978년 宮城縣沖地震 등에서 중파이상의 대피해가 발생하였지만, 建築基準法施行令의 개정후의 RC기준의 강화(특히, 기둥의 전단설계의 강화)[11]에 의하여, 상기의 지진동에 대하여 피해가 발생할 가능성이 있는 건물의 비율이 감소했다는 사실을 알 수 있다.

#### 4.2.5 용도별의 $I_S$ 치의 분포

표 1에 대상건물의 대표적인 용도의 1층(장변 및 단변방향)의  $I_S$ 치의 통계치를 나타내었고, 그림 7에는 그것들의 대수정규분포에 의한 근사곡선의 비교를 나타내었다.

동 그림 및 표에 의하면,  $I_S$ 치가 가장 높은 학교체육관은 1971년의 建築基準法施行令[11]의 개정 이전보다는, 이후에 건설되어진 건물이 많다는 것을 알 수 있는 반면,  $I_S$ 치가 가장 낮은 주택은 개정 이전에 건설되어진 것이 많고, 가장 위험한 파괴형식인 극단주(極短柱) [ $h_o/D$ 가 2이하인 기둥, 여기서  $h_o$ :기둥높이, 다만 수벽(hanging wall) 및 징두리벽(spandrel wall)이 있는 경우는 그 폭만큼 기둥 높이를 줄임,  $D$ :기둥폭]전단파괴형건물(문헌[3]참

표 1 대표적인 용도별의 1층(장변 및 단변방향)의  $I_S$ 치의 통계치

건 물	학교체육관	학 교	경찰 및 소방서	주 택	
건설년도	1971년이전	1.29 / <1>	0.95(0.50) / 0.53<18>	1.04(0.56) / 0.54<29>	0.75(0.42) / 0.56<44>
	1971년이후	1.31(0.52) / 0.40<53>	1.06(0.37) / 0.35<23>	1.05(0.50) / 0.48<72>	0.75(0.21) / 0.28<8>
층수	1	무	0.20(0.52) / 0.43<7>	0.98(0.26) / 0.27<2>	1.78(0.40) / 0.22<2>
	2	1.69(0.47) / 0.28<14>	1.08(0.54) / 0.50<6>	1.23(0.52) / 0.42<44>	무
	3	1.64(0.49) / 0.30<4>	1.09(0.38) / 0.35<18>	1.03(0.53) / 0.51<29>	0.90(0.21) / 0.23<4>
	4	1.12(0.44) / 0.39<36>	무	0.77(0.44) / 0.57<10>	0.73(0.31) / 0.42<22>
	5	무	0.71(0.22) / 0.31<10>	0.76(0.34) / 0.45<14>	0.61(0.33) / 0.54<20>
	6	무	무	0.65(0.1) / 0.15<2>	0.90(0.49) / 0.54<4>
파괴형식	극단주전단	1.23(0.55) / 0.45<25>	0.65(0.17) / 0.26<10>	1.01(0.53) / 0.52<53>	0.69(0.38) / 0.55<28>
	전단	1.51 / <1>	1.07(0.59) / 0.55<6>	1.12(0.64) / 0.57<14>	0.86(0.36) / 0.42<7>
	힘전단	1.33(0.45) / 0.34<27>	1.11(0.36) / 0.32<23>	1.07(0.45) / 0.42<32>	0.79(0.43) / 0.54<17>
	휨	2.37 / <1>	1.57(0.39) / 0.25<2>	1.29(0.57) / 0.44<2>	무

注) 표중의 숫자는 평균치(표준편차) / 변동계수(데이터수)을 나타낸다(파괴형식은 문헌[3]참조).

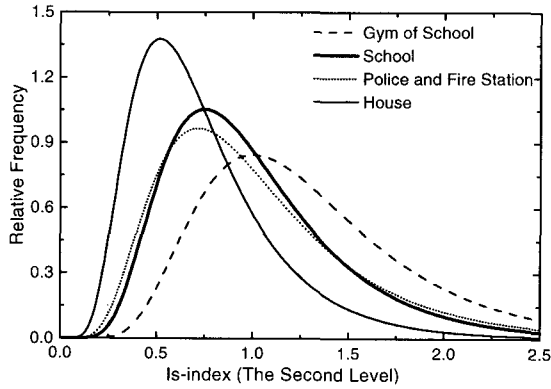


그림 7 대표적인 용도별의  $I_S$ 치의 분포

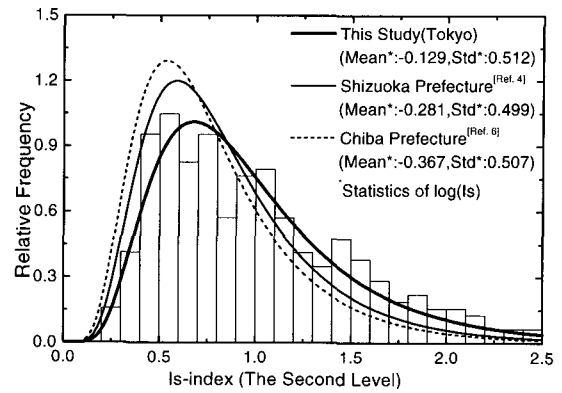


그림 8 타 지역의  $I_S$ 치분포와의 비교

조)의 비율이 전체의 50%을 넘고 있다. 학교건물은 1층의 비율이 타 용도의 건물에 비교해 높고, 극단주전단파괴형건물의 비율은 낮은 반면, 횡전단파괴형건물(문헌[3]참조)은 높은 비율을 나타내고 있다.

#### 4.2.6 타지역의 $I_S$ 치의 분포와의 비교

그림 8에 靜岡縣[4], 千葉縣[6] 및 본 조사지역인 東京都의 기존 RC건물의 제2차내진진단의 1층(장변 및 단변방향)의  $I_S$ 치분포를 각각 비교한 것을 나타내었다. 그림 8의 비교에 의하면, 靜岡縣 및 千葉縣에 비하여 본 조사지역인 東京都의  $I_S$ 치분포가 다소 높은 경향을 나타내고 있다.

이것은 본 대상지역의 데이터는, 1971년의 建築基準法施行令[11]의 개정이후의 건물의 비율은 용도에 의해 다소 차가 있으나, 전체적으로는 개정이후의 것이 약50%( $I_S$ 치<2.5)를 차지하고 있는 반면, 靜岡縣 및 千葉縣의 데이터를 이용한 분석결과에서는 약30%정도이고, 본 대상지역에서는 비교적 새로운 건물의 비율이 높은 것이 주요인 이라고 사료된다.

### 5. 확률론에 의한 지진피해율의 추정

岡田·中埜[4][5]는, 靜岡縣의 기존 RC건물의  $I_S$ 치분포를 이용하여, 확률론에 입각한 지진피해율의 평가에 관하여 검토하였다. 본 연구에서는, 상기

의 岡田·中埜가 사용한 수법을 적용하여, 본 연구에서 조사한 東京都 및 타 지역의 기존 RC건물의  $I_S$ 치분포와 지진피해율과의 관계를 비교·검토하였다.

#### 5.1 지진피해율의 추정방법

건물군의  $I_S$ 치의 확률밀도함수를  $P_{I_S}(x)$ , 하중효과(이하,  $E_T$ 치)의 확률밀도함수를  $P_{E_T}(x)$  라고 한다. 상기의  $E_T$ 치는, 입력지진레벨을  $I_S$ 치로 환산한 것으로서, 즉 입력지진의 가속도레벨의 지진동에 대하여 안전하기 위해 필요한  $I_S$ 치로서, 입력지진동에 의하여  $E_T$ 치가 확률량이 되는 것으로 가정한다.

여기서, 「전 건물에 대한 피해건물수의 비율」을 「피해율  $V$ 」라고 정의하면, 그 피해율  $V$ 는 식(3)로서 표현가능 하다[4][5].

$$V = \int_0^{\infty} P_{I_S}(x) \cdot \left[ 1 - \int_0^x P_{E_T}(r) dr \right] dx \quad (3)$$

$$u(x) = P_{I_S}(x) \cdot \left[ 1 - \int_0^x P_{E_T}(r) dr \right] \quad (4)$$

$x = I_S$ 치 (또는  $E_T$ 치)

(3)식의 [ ]항은  $\text{Prob}[P_{E_T} > x]$ , 즉  $I_S = x$ 의 건물의 피해확률을 나타내는 것이고, 또한 (4)식에 나타내는 것처럼  $u(x)$ [(3)식의 피적분항(被積分項)]은 피해건물의  $I_S$ 치분포를 나타낸다. 따라서,  $P_{I_S}(x)$  및  $P_{E_T}(x)$ 로부터 (3)식 및 (4)식을 사용하여 피해

을  $V$  및 피해건물의  $I_S$ 치분포  $v(x)$ 가 추정가능 하다.

본 연구에서는, 건물군의  $I_S$ 치의 확률밀도함수  $P_{I_S}(x)$ 는 그림 8에 나타난 분포를 사용하였고,  $E_T$ 치의 확률밀도함수  $P_{E_T}(x)$ 는 문헌[4]의 静岡縣의 피해상정시 사용한 분포를 사용하여 대상지역의 지진 피해율을 추정하였다. 한편, 문헌[4]의  $E_T$ 치는, 특정지진(1968년 十勝沖地震 및 1978년 宮城縣沖地震)을 대상으로 한 하중효과(피해정도는 중파이상이고, 지진가속도레벨은 0.23g)이고, 또한 입력지진동의 지반에 의한 편중의 영향은 없는 것으로 가정하여, 빈도분포를 (5)식에 나타내는 정규분포곡선으로 근사시킨 것이다.

$$P_{E_T}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right] \quad (5)$$

( $x = E_T$ 치,  $\mu = 0.399$ ,  $\sigma = 0.085$ )

그림 9에는 상기의 지진피해율의 추정방법을 이용한 東京都의 경우의 지진피해율의 추정 예를 나타낸 것으로, 그림 9의 곡선-I[지진가속도레벨 0.23g일 경우의 피해건물의  $I_S$ 치분포  $v(x)$ , 피해율  $V=7\%$ ]은 그림 9의 곡선-II[그림 8의 東京都의  $P_{I_S}(x)$ ]와 식(5)의  $E_T$ 치의 확률밀도함수  $P_{E_T}(x)$ 을 토대로 식(3) 및 (4)를 사용하여 피해건물의  $I_S$ 치분포  $v(x)$ 를 추정하였다. 이하, 타 2지역에 관해서도 동일하게 추정하였다.

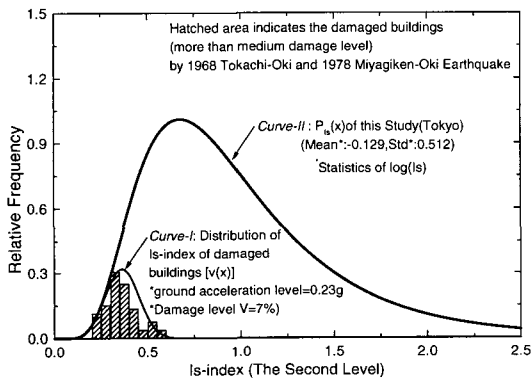


그림 9 피해율의 추정 예 (東京都의 피해건물의  $I_S$ 치의 분포)

### 5.2 지진피해율의 추정결과

조사지역인 東京都의 피해건물의  $I_S$ 치와 지진피해율과의 관계를 그림 10에, 千葉縣의 피해건물의  $I_S$ 치와 지진피해율과의 관계를 그림 11에, 静岡縣[4]의 피해건물의  $I_S$ 치와 지진피해율과의 관계를 그림 12에 나타내었다. 또한, 문헌[13]에 나타난 것과 같이, 1968년 十勝沖地震 및 1978년 宮城縣沖地震에 의한 탁월주기(predominant period) 0.4 초의 지반에 있는 건물에 입력되어지는 지진가속도레벨을 0.23g로 설정하고 있지만, 그림 10~12에는 입력지진가속도레벨이 0.36g, 0.45g로 변화할 경우에 있어서의 피해율  $V$  및 피해건물의  $I_S$ 치분포

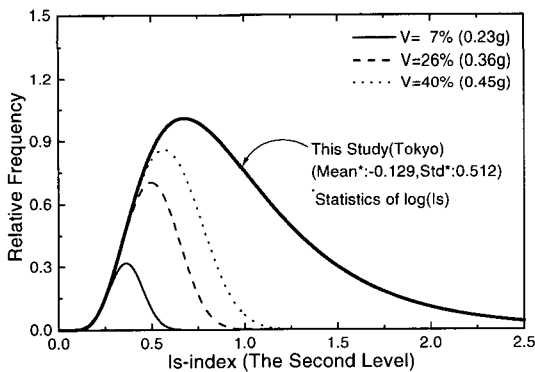


그림 10 본 조사지역(東京都)의 피해건물의  $I_S$ 치와 지진피해율의 분포

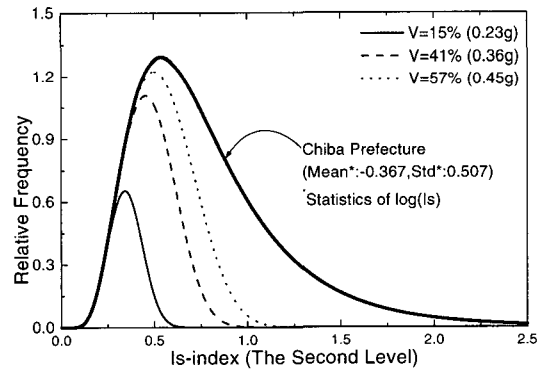


그림 11 千葉縣의 피해건물의  $I_S$ 치와 지진피해율의 분포



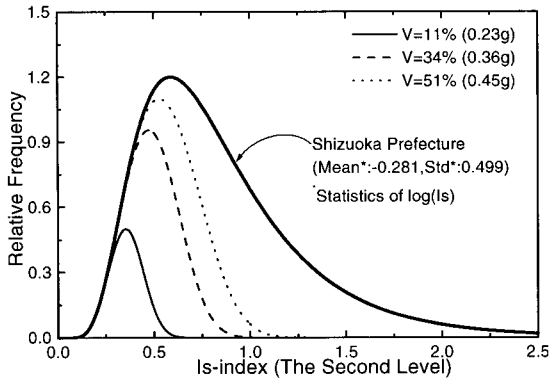


그림 12 靜岡縣(4)의 피해건물의  $I_s$ 치와 지진피해율의 분포

$v(x)$ 의 추정도 같이 나타내었다.

이것은 계(系)의 허용소성률과 요구내력비(지진 응답량(應答量)과 허용소성률의 한계에 받아들일 수 있기에 필요한 내력과 입력레벨의 비)를 결정하면, 필요한  $I_s$ 치가 입력지진가속도에 비례해서 결정된다는 관계가 성립하기 때문에,  $E_T$ 치의수(식(5))를 변동계수는 일정하게 하고, 평균치만 각각 0.36/0.23배, 0.45/0.23배로 하여 피해율  $V$  및 피해건물의  $I_s$ 치분포  $v(x)$ 를 추정했다.

그 추정결과에 의하면, 본 연구의 대상지역에서는 지진가속도 0.23g에서는 7%, 0.36g에서는 26%, 0.45g에서는 40%의 지진피해율이 추정되어, 타 지역보다 지진피해율은 낮게 추정되었다. 이것은, 이미 제4.2.6절에서 서술한 것과 같이 본 연구의 대상지역의  $I_s$ 치분포가 타 지역에 비교해서 높기 때문이라고 사료된다.

그림 13에는 본 대상지역, 靜岡縣 및 千葉縣에 대한 특정지진(1968년 十勝沖地震, 1978년 宮城縣沖地震)의 입력레벨, 즉 0.23g에 대한 지진피해의 상승률을 나타내었다. 입력지진동이 0.36g, 0.45g가 되면 그 피해율이 본 대상지역의 경우에는 약 3.7배, 5.7배로, 千葉縣의 경우에는 약 2.7배, 3.8배로, 靜岡縣의 경우에는 약 3.1배, 4.6배로 증가하는 사실을 알 수 있다. 이것은 타 지역에 비교하여, 본 대상지역은 입력레벨에 대한 피해율은 낮지만, 그 상승률은 보다 높게 된다는 사실을 알 수 있다. 즉 본 대상지역에서는, 입력레벨의 증대에 수반하여

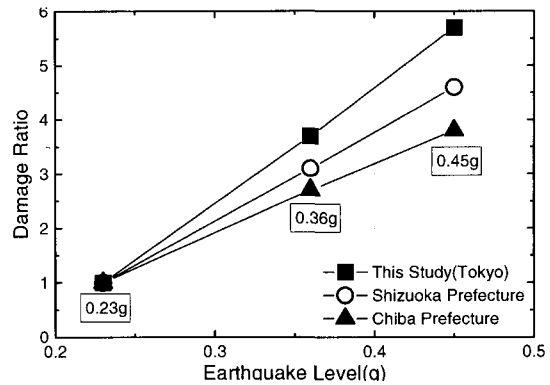


그림 13 입력가속도와 지진피해율의 상승률

피해가 보다 급격하게 확대할 가능성이 있다는 사실을 보여준 것이라고 사료된다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 일본 東京都에서 실시되어진 지진 경험이 없는 기존 RC건물 168동의 내진진단기준에 의한 내진진단결과를 바탕으로 그 내진성능( $I_s$ 치)을 통계분석하여, 이미 실시되어진 타 지역의 내진성능의 분석결과와 비교·검토하였다. 또한, 확률론에 입각하여 상기의 분석결과와 이미 지진 피해를 받은 건물의 내진성능을 비교·검토하여, 기존 RC건물의  $I_s$ 치와 지진피해율과의 관계에 관해서 검토를 하였다.

이상, 검토결과를 정리하면 다음과 같다.

### 1) 본 조사지역의 내진성능

① 기존 RC건물의  $I_s$ 치(제2차내진진단)분포는 0.7부근에 피크를 가지는 대수정규분포로 근사가 가능하였고, 그 내진성능에는 건물에 의하여 큰 차이가 있는 것으로 나타났으며, 타 지역에 비교해서 본 대상지역의  $I_s$ 치가 다소 높은 분포를 보였다.

② 1971년의 建築基準法施行令의 개정전후에는 내진성능의 변화를 보여주었고, 건축연도에 의한  $I_s$ 치의 분포에는 큰 차이가 있

다는 사실을 확인했다. 이러한 사실은 建築基準法の 개정에 의한 기둥의 진단설계의 강화의 영향이 큰 것으로 사료된다.

- ③ 용도별 1층  $I_S$ 치 분포의 변화를 보면,  $I_S$ 치가 가장 높은 건물은 학교체육관인 반면, 가장 낮은 건물은 주택으로 나타났다.

2) 타 지역의 지진피해율과의 관계

- ① 静岡縣에서는, 상정입력지진가속도0.23g에서는 11%, 0.36g에서는 34%, 0.45g에서는 51%의 지진피해율이 추정되었고, 千葉縣에서는, 15%(0.23g), 41%(0.36g), 57%(0.45g)의 지진피해율이 추정되었다. 한편, 본 대상지역의 경우에는, 7%(0.23g), 26%(0.36g), 40%(0.45g)의 지진피해율이 추정되어, 상기의 지역보다는 피해율은 낮게 추정되었다.

- ② 상정입력지진가속도0.23g에 대한 지진피해 상승률이 본 대상지역의 경우에는 약3.7배, 5.7배로 증가하여, 타지역(静岡縣 및 千葉縣)에 비교하여 지진피해율은 낮게 추정되었지만, 그 상승률은 보다 높게 나타났다. 상기의 결과는, 본 대상지역에서는 입력레벨의 증대에 수반하여 피해가 보다 급격하게 확대할 가능성이 있다는 사실을 보여준 것이라고 사료된다.

향후 검토대상지역의 확대, 보다 폭넓은 내진진단결과와 자료확보, 지진피해를 받은 다수의 지역의  $I_S$ 치의 분포특성의 고찰 등에는 충분한 연구가 필요하지만, 상기의 지진경험이 없는 RC건물의 내진성능의 분석결과 및 확률론에 입각한 지진피해율의 추정결과는 지진국 일본에서 근 장래에 발생 가능한 대규모의 지진에 대한 보강건물의 효율적인 선정 등, 지진대책에 기초적인 자료로서 활용이 가능하다고 사료된다.

한편, 향후 한국실정에 맞는 RC건물의 내진화기술의 개발에는 상기의 검토결과보다는 일본의 내진성능의 평가수법, 통계학적인 분석의 방법 및 확률

론에 입각한 지진피해율의 평가방법 등의 방법론이 기본적인 자료로서 활용이 가능하다고 사료된다.

**부록1: 최우법(method of maximum likelihood)에 의한 최적분포의 결정**

**1. 최우법**

최우법은 대상으로 하는 이론분포에 대하여 우도(likelihood)를 최대로 하는 분포형의 변수치를 결정하여, 그 변수치를 사용한 분포형에 실측데이터를 대조하여, 우도가 최대로 되는 이론분포형을 최적분포로 하는 통계적 방법이다[14][15].

복수의 모수(母數)를 가지는 확률밀도함수( $f_x$ )에 대한 우도함수(likelihood function)  $L$ 는 부식(1)에 의하여 나타낸다.

$$L[X(1), X(2), \dots, X(n); \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m] = \prod f_x(X(i); \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m) \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad \text{부식(1)}$$

다만,  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m$ 는 추정할  $m$ 개의 모수이다. 이 경우의 최우추정량(maximum likelihood estimator)은 부식(2-a) 및 (2-b)에 나타내는 연립방정식으로 결정된다.

$$\frac{\partial L[X(1), X(2), \dots, X(n); \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m]}{\partial \theta_k} = 0 \quad k=1, 2, \dots, m \quad \text{부식(2-a)}$$

또는,

$$\frac{\partial \ln L[X(1), X(2), \dots, X(n); \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m]}{\partial \theta_k} = 0 \quad k=1, 2, \dots, m \quad \text{부식(2-b)}$$

이상의 식으로부터 구한 최우추정량  $\theta$ 를 우도함수[부식(1)]에 대입하여 얻어지는 치가 우도이고, 이 치가 클수록 그 분포형에의 적합도가 최적이 된다. 실제의 우도를 계산할 경우에는 우도함수  $L$ 이 곱의 형태이기 때문에 데이터수  $n \rightarrow \infty$ 가 되면,

부표 1 최우법에 의한 최적분포의 결정

분포형	변수	우도(likelihood)(lnL)
정규분포	$\mu=0.996, \sigma=0.495$	-225.37
대수정규분포	$\lambda=-0.129, \xi=0.512$	-195.01
I형극치분포	$\alpha=2.628, u=0.769$	-198.51
III형극치분포	$\epsilon=0.00, x=2.159, v=1.130$	-202.76
	$\epsilon=0.05, x=2.046, v=1.073$	-199.78
	$\epsilon=0.10, x=1.928, v=1.015$	-196.58

주)우도가 최대로 되는 분포는 대수정규분포이고, 본 연구에서는 대수정규분포를 최적분포로 판단하였다.

$L \rightarrow 0$ 로 된다( $\therefore f_x(X(i); \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m) < 1$ ). 따라서, 우도함수  $L$ 에 대수(lnL)를 취하여, 우도를 합의 형태로 하여 lnL이 최대로 되는 분포형을 최적분포형으로 결정한다.

2. 최적분포의 결정

부1.1에 의하여 최우치를 결정하여, 최적분포를 판단하였다. 그 결과는 부표1과 같다. 그리고 최적분포의 판단에 이용한 부표1의 (1)정규분포, (2)대수정규분포, (3) I형극치분포 및 (4)III형극치분포의 확률밀도함수  $f_x$  및 우도함수의 lnL을 부식(3)~(6)에 나타낸다[(1)~(4)의 각 변수의 상세는 문헌[14][15]를 참조].

부표1로부터, 우도가 최대로 되는 분포는 대수정규분포이고, 본 연구에서는 대수정규분포를 최적분포로 판단하였다.

1) 정규분포(normal distribution)

$$f_x(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right] \text{부식(3-a)}$$

$$\ln L = -n \cdot \ln\sqrt{2\pi} - n \cdot \ln\sigma - \left(\frac{1}{2\sigma^2}\right) \sum (x_i - \mu)^2 \text{부식(3-b)}$$

2) 대수정규분포(logarithmic normal distribution)

$$f_x(x; \lambda, \xi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\xi x} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln x - \lambda}{\xi}\right)^2\right] \text{부식(4-a)}$$

$$\ln L = -n \cdot \ln\sqrt{2\pi} - n \cdot \ln\xi - \sum \ln x_i - \left(\frac{1}{2\xi^2}\right) \sum (\ln x_i - \lambda)^2 \text{부식(4-b)}$$

3) I형극치분포(type I extreme-value distribution)

$$f_x(x; a, v) = a e^{-a(x-u)} \exp[-e^{-a(x-u)}] \text{부식(5-a)}$$

$$\ln L = n \cdot \ln a - a \sum x_i + n a u - \sum \exp[-a(x_i - u)] \text{부식(5-b)}$$

4) III형극치분포(type III extreme-value distribution)

$$f_x(X; v, \epsilon, x) = \frac{x}{v-\epsilon} \left(\frac{x-\epsilon}{v-\epsilon}\right)^{x-1} \exp\left[-\left(\frac{x-\epsilon}{v-\epsilon}\right)^x\right] \text{부식(6-a)}$$

$$\ln L = n \ln x + x \sum \ln(x_i - \epsilon) - x n \ln(v) - \sum \ln(x_i - \epsilon) - \sum \left(\frac{x_i - \epsilon}{v}\right)^x \text{부식(6-b)}$$

참고 문헌

1. 건설부, "건축물의 내진구조 및 방재기준에 관한 연구(제1권)", 1987, pp.57~135
2. 日本建築學會, "1968年十勝沖地震災害調査報告", 1968

3. (財)日本建築防災協會, “既存コンクリート造建築物の耐震診断基準・付解説”, 1977(1990年改訂)
4. 中埜良昭, “信頼性理論による鉄筋コンクリート建築物の耐震安全性に関する研究”, 東京大學建築學科學位論文, 1988
5. 梅村魁, 岡田恒男, 村上雅也, “鉄筋コンクリート建物の耐震診断基準のための耐震判定指標について”, 日本建築學會學術講演梗概集, 1980.9
6. 村上雅也他, “1987年千葉縣東北沖地震による被災鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断: その2 構造耐震指標値と被災程度”, 日本建築學會學術講演梗概集, 1980.10
7. 日本建築學會, “1978年宮城縣沖地震災害調査報告”, 1978
8. 日本建築學會, “1978年伊豆大島近海地震災害調査報告”, 1978
9. 建設省建築研究所, “平成7年兵庫縣南部地震被害調査中間・最終報告書”, 1996
10. 日本建築學會, “鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説”, 1992
11. 日本建築學會, “鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説”, 1971
12. 志賀敏男, 柴田明德他, “鉄筋コンクリート造建築物の震害と壁率”, 日本建築學會東北支部研究報告集12號, 1968.10
13. 村上雅也, “耐震性能の評価法と判定値の設定”, 日本建築學會建築雜誌, Vol.95, No.1170, pp.32~39, 1980.9
14. Alfredo H-S. Ang, Wilson H. Tang *Probability Concepts in Engineering Planning Design(Volume1: Basic Principals and Volume2: Decision, Risk and Reliability)*, John Willey & Sons, Inc.
15. 杉山俊幸, 前原陽三, 伊藤學, “統計データからの分布形・統計値の決定”, 日本構造工學會論文集, Vol.31A, 1985.3

(접수일자 : 1999. 5. 21)