

지진응답해석에 의한 내진판정 기본지표

Basic Seismic Protection Index by Seismic Response Analysis

이 원 호* 이 강 석** 최 호***
Yi, Waon-Ho Lee, Kang-Seok Choi, Ho

Abstract

In Korea, countermeasures against earthquake disasters such as the seismic performance evaluation and/or retrofit scheme of buildings have not been fully performed since Korea had not been experienced many destructive earthquakes in the past. The main objective of this paper is to propose the basic seismic protection index (E_s) suitable to Korean buildings based on the seismic evaluation of existing reinforced concrete buildings using modified strength index.

This paper will focus on 1) the selection of weak and moderate earthquake waves representing Korean seismic zone, 2) the creation of the required strength ratio spectra by seismic response analysis, and 3) the proposition of the basic seismic protection index (E_s) suitable to Korean seismic activity based on required strength ratio spectra

1. 서론

국내 건물의 대다수는 내진설계가 도입되기 이전에 건설된 것으로서, 이러한 건물에 대한 확실한 내진성능을 평가하여 현행의 내진설계법에 의하여 건설된 건물과 동등한 수준의 내진성능을 효과적으로 확보한다면 내진설계가 도입되기 이전에 건설된 건축물에 대한 불안은 해소될 것이다. 그러므로, 현존 건물에 대한 내진성능의 평가기법의 개발이 필수적이며, 이러한 내진성능 평가기법을 바탕으로 한 효과적인 내진보강 공법의 개발이 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 일본의 현존 철근콘크리트 건물의 내진진단기준을 적용하여 국내 실정에 맞는 내진성능의 평가기법을 제안한 문헌[1]의 연구결과를 바탕으로, 국내 실정에 맞는 내진판정 기본지표의 설정을 연구의 목적으로 한다.

일본의 내진진단 기준에서는 1968년 토카치오키(十勝沖)지진 및 1978년 미야기켄오키(宮城縣沖)지진에서 피해를 입은 RC건물의 구조내진지표(I_s)를 근거로 내진판정기본지표인 E_s 를 1차 진단에서는 0.8, 2차 진단에서는 0.6으로 설정을 하고 있으며, 이 값은 문헌[2] 및 문헌[3] 등에서 지진응답해석법에 의하여 검증되었다. 그러나, 국내의 지진활동을 적절하게 나타낼 수 있는 피해지진 자료는 충분하지 못하기 때문에 본 연구에서는 현행의 국내 내진설계법에 의하여 건설되는 건축물과 동등한 수준의 내진성능을 확보할 수 있도록 내진설계법에서 규정하는 내력수준에 적합한 구조내진 성능지표(I_{so})를 평가·검증하여, 이것을 토대로 국내 실정에 적합한 내진성능 판정지표를 다음과 같이 설정한다. 첫 번째, 국내의 지진활동, 즉 내진기준에서 설정한 지역계수를 적절하게 나타낼 수 있는 지진파를 선정한다. 두

* 정회원, 광운대학교 건축공학과 교수, 공학박사

** 정회원, 미국 NIST Guest Researcher, 공학박사

*** 정회원, 일본 동경대학 대학원생, 공학석사

번째, 선정지진파의 입력수준을 고려한 지진응답해석을 실시하여 요구내력비 스펙트럼을 작성한다. 세 번째, 요구내력비 스펙트럼 결과를 토대로, 국내의 지진활동에 적합한 내진판정 기본지표를 설정한다.

2. 요구내력비 스펙트럼⁽³⁾

1질점계(SDOF) 모델에서 지진파의 최대가속도의 증력가속도에 대한 비를 α 로 가정하고, 복원력특성 및 감쇠를 가정하여 그 주기와 내력을 각각 T 및 κ 로 가정한다. 여기서, 주기 T 를 특정한 값으로 간주하여 지진응답량을 소성율 μ (κ 에 대응하는 변위 δ 에 대한 비)로 표현하면, 1질점계 모델의 α , κ , μ 3개의 무차원화된 변수는 탄소성 지진응답해석에 의하여 관계가 지어진다.

요구내력비 스펙트럼은 소성율(μ)에 중점을 두고 상기의 삼자의 관계와 주기(T)를 결부시킨 것이다. 요구내력비는 $\beta = \kappa / \alpha$ 로 나타내고, 지진응답량은 임의의 소성율(μ)에 필요로 하는 최소의 내력비를 나타내고, 각각의 주기에 대하여 얻어지는 요구내력비를 총칭하여 요구내력비 스펙트럼이라고 정의한다. 내진진단기준의 보유성능기본지표 E_0 는 κ 와 동등한 강도지표(C)와 C 로부터 결정되는 인성지표(F)를 도입하여, 식(1)의 형식으로 표현된다.

$$E_0 = C \times F \quad (1)$$

식(1)로부터 α 를 결정하여 특정한 κ 와 μ 의 관계로부터 E_0 를 구하면, 이 값이 E_0 에 대응하는 α 에 대한 내진판정지표가 된다(이 값이 내진판정 기본지표, E_s). 본 연구에서는 요구내력비를 한계소성률에 대한 최소한의 내력비로 생각하여, κ 와 μ 의 관계를 요구내력비 스펙트럼으로부터 구하고, 식(1)에 $C = \alpha \times \beta$ 을 대입하면, 내진판정 기본지표 (E_s)는 식(2)와 같이 된다.

$$E_s = \alpha \times \beta \times F \quad (2)$$

3. 지진응답해석의 개요

3.1 지진파의 설정

입력지진파는 국내의 지진활동에 적합한 중·소규모의 지진을 선정한 것으로서, 문헌[4]에서 선정·분류한 101개의 지진파를 사용하였으며, 토질조건 및 선정조건은 다음과 같다.

(1) 토질조건

- | | |
|---------------------------------|---------------------------|
| 1) 토질조건1(S1) - 기반암, 경암, 침적암, 역암 | 2) 토질조건2(S2) - 경질지반, 경질점토 |
| 3) 토질조건3(S3) - 충적토, 연질지반 | |

(2) 선정조건

- | | |
|--|----------------|
| 1) 수평성분의 지진자료만 선택한다. | 2) 여진자료는 제외한다. |
| 3) 최대 지반가속도(PGA)가 30~150 cm/sec ² (0.03~0.15g)인 지진자료만 선택한다. | |

3.2 복원력특성

1질점계의 복원력 모델은 그림1에 나타난 D-Tri형(Degrading Trilinear) 모델과 그림2에 나타난 원점지향형(Origin-Oriented) 모델을 사용하였고, 각각 휨파괴 및 전단파괴하는 철근콘크리트 건물을 대표하고 있다. 그림1에 나타난 바와 같이, D-Tri형 모델은 일반적으로 항복점내력 P_y 와 균열내력 P_c 의 비율 및 항복점주기 T_2 와 탄성주기 T_1 의 비율에 따라 4종류가 있으나, 본 연구에서는 가장 큰 요구내력비가 요구되는 $T_2=2^{(1/2)}T_1$, $P_y=3P_c$ 의 경우를 사용하였다. 한편, 원점지향형 모델은 그림2에 나타난 바와 같이, $\delta_y=10\delta_c$, $P_y=1.9P_c$ 의 경우를 사용하였다.

3.3 해석 케이스

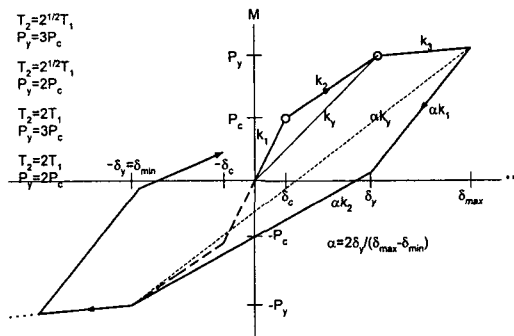


그림 1 D-Tri형(Degrading Trilinear) 복원력 모델

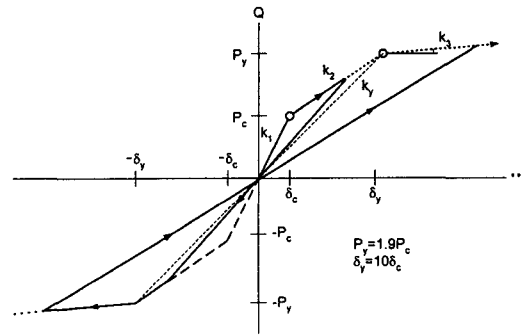


그림 2 원점지향형(Origin-Oriented) 복원력 모델

본 연구에서는 국내의 내진기준에서 설정한 지역계수(지진구역 I 및 지진구역 II)를 적절하게 나타낼 수 있도록 3.1절에서 선정한 101개의 지진파를 최대가속도가 0.08g(지진구역 I) 및 0.12g(지진구역 II)로 표준화하여 지진응답해석을 실시하여 국내 실정에 적합한 내진판정 기본지표 (E_s)를 설정한다.

또한, 내진판정 기본지표값 설정시 요구되는 한계소성률을 건물의 지진시의 피해상황과 응답성상과의 관계를 고려하여 D-Tri형 모델에 대해서는 $\mu=2$ (중규모의 지진피해), 원점지향형 모델에 대해서는 $\mu=10$ (중규모의 지진피해)으로 설정하여 요구내력비 스펙트럼을 작성한다. 표1에 본 연구의 해석케이스를 나타내었다.

표 1 지진응답의 해석케이스

해석케이스	복원력특성	지반조건	A_{MAX}	μ
Dt-S1-80	D-Tri	Soil-1	80	2
Dt-S1-120			120	
Dt-S2-80		Soil-2	80	
Dt-S1-120			120	
Dt-S2-80		Soil-3	80	
Dt-S3-120			120	
Oo-S1-80	Origin-Oriented	Soil-1	80	10
Oo-S1-120			120	
Oo-S2-80		Soil-2	80	
Oo-S3-120			120	
Oo-S3-80		Soil-3	80	
Oo-S3-120			120	

3.4 기타

- (1) 적분 시간 간격 : 0.001초
- (2) 적분 방법 : 선형가속도법(Linear Acceleration Method)
- (3) 감쇠 : 순간강성에 비례하는 감쇠정수로서 h 는 3%

4. 내진판정지표 스펙트럼

4.1 D-Tri형 모델

그림3~그림8은 지반조건 Soil-1, 2 및 3의 국내 내진기준의 지진구역 I ($\alpha=0.08$, $A_{MAX}=80\text{gal}$) 및 지진구역 II ($\alpha=0.12$, $A_{MAX}=120\text{gal}$)를 상정한 내진판정지표 스펙트럼을 각각 나타낸 것으로서, 요구내력비 β 는 한계소성률 $\mu=2$ 에 필요로 하는 최소 항복내력 P_y 를 입력지진동에 대한 비로써 나타낸 것

이고, 인성지표(F)는 내진진단기준의 소성을 $\mu=2$ 에 해당하는 값으로 $F=2.1$ 이다.

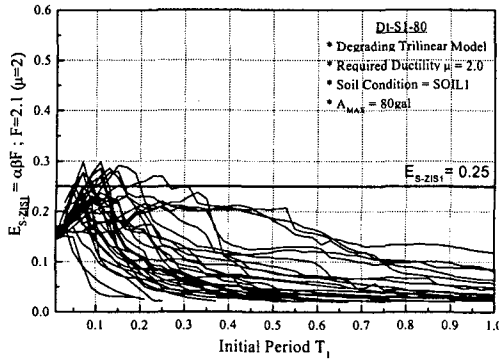


그림 3 지진구역 I의 Soil-1에 대한
내진판정지표 스펙트럼
(Dt-S1-80 : D-Tri, $A_{MAX}=80gal$, $\mu=2$, $F=2.1$)

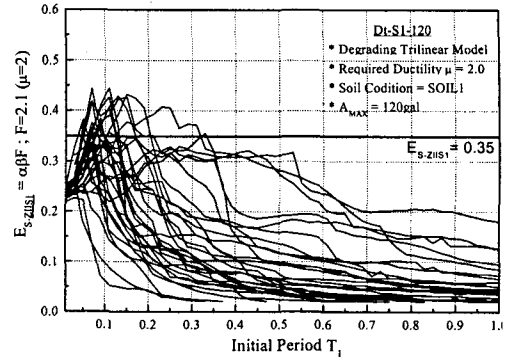


그림 4 지진구역 II의 Soil-1에 대한
내진판정지표 스펙트럼
(Dt-S1-120 : D-Tri, $A_{MAX}=120gal$, $\mu=2$, $F=2.1$)

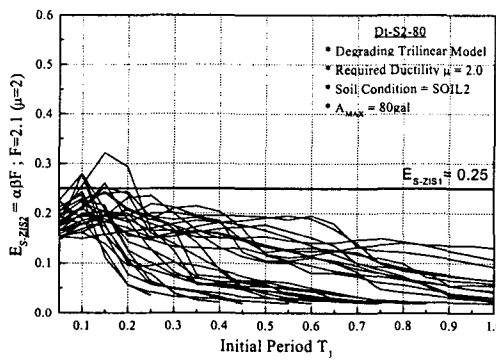


그림 5 지진구역 I의 Soil-2에 대한
내진판정지표 스펙트럼
(Dt-S2-80 : D-Tri, $A_{MAX}=80gal$, $\mu=2$, $F=2.1$)

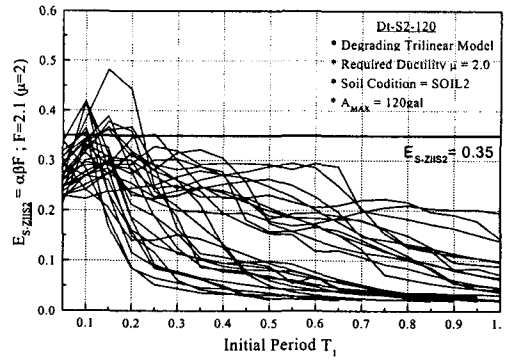


그림 6 지진구역 II의 Soil-2에 대한
내진판정지표 스펙트럼
(Dt-S2-120 : D-Tri, $A_{MAX}=120gal$, $\mu=2$, $F=2.1$)

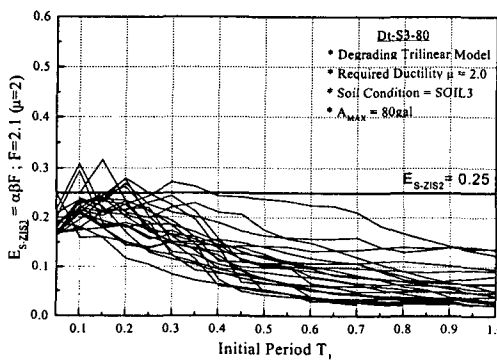


그림 7 지진구역 I의 Soil-3에 대한
내진판정지표 스펙트럼
(Dt-S3-80 : D-Tri, $A_{MAX}=80gal$, $\mu=2$, $F=2.1$)

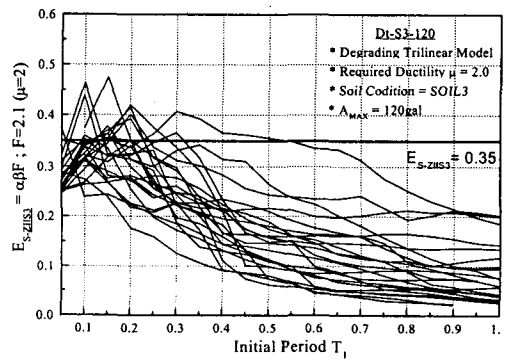


그림 8 지진구역 II의 Soil-3에 대한
내진판정지표 스펙트럼
(Dt-S3-120 : D-Tri, $A_{MAX}=120gal$, $\mu=2$, $F=2.1$)

4.2 Origin-Oriented형 모델

그림9~그림14는 지반조건 Soil-1, 2 및 3의 국내 내진기준의 지진구역 I ($\alpha=0.08, A_{MAX}=80gal$) 및 지진구역 II ($\alpha=0.12, A_{MAX}=120gal$)를 상정한 내진판정지표 스펙트럼을 나타낸 것으로서, 요구내력비 β 는

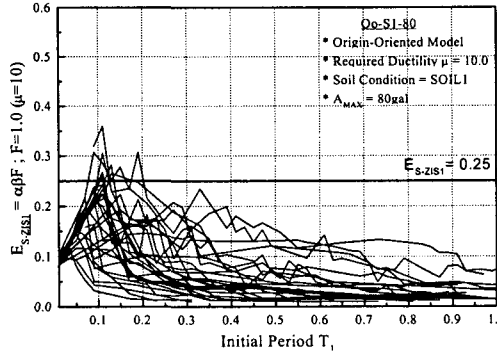


그림 9 지진구역 I의 Soil-1에 대한 내진판정지표 스펙트럼

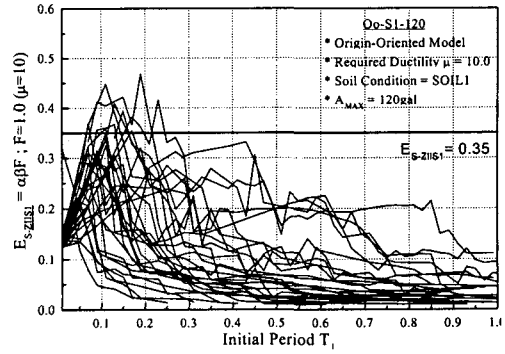


그림 10 지진구역 II의 Soil-1에 대한 내진판정지표 스펙트럼

(Oo-S1-80 : Origin-oriented, $A_{MAX}=80gal, \mu=10, F=1.0$) (Oo-S1-120 : Origin-oriented, $A_{MAX}=120gal, \mu=10, F=1.0$)

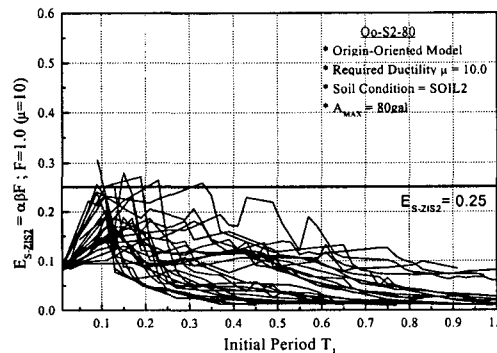


그림 11 지진구역 I의 Soil-2에 대한 내진판정지표 스펙트럼

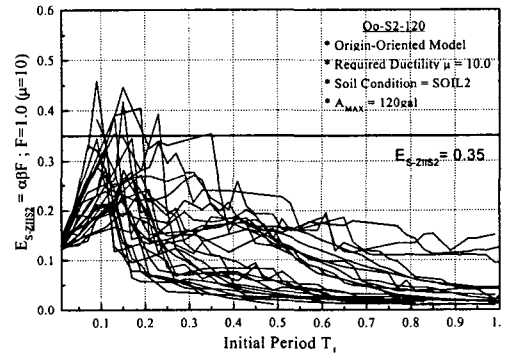


그림 12 지진구역 II의 Soil-2에 대한 내진판정지표 스펙트럼

(Oo-S2-80 : Origin-oriented, $A_{MAX}=80gal, \mu=10, F=1.0$) (Oo-S2-120 : Origin-oriented, $A_{MAX}=120gal, \mu=10, F=1.0$)

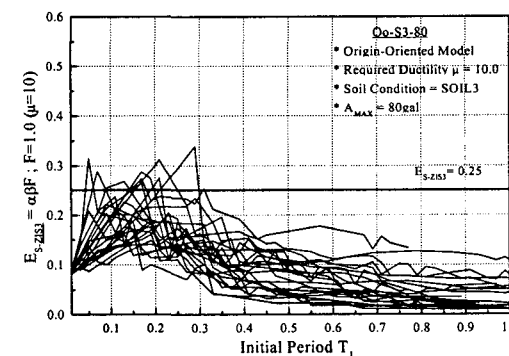


그림 13 지진구역 I의 Soil-3에 대한 내진판정지표 스펙트럼

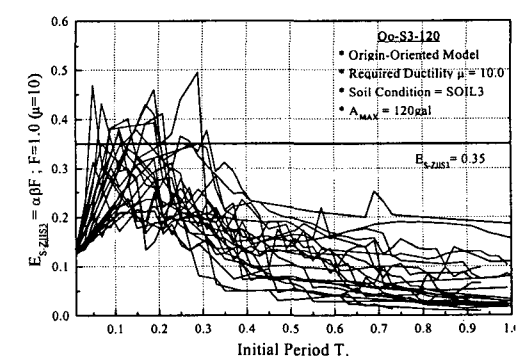


그림 14 지진구역 II의 Soil-3에 대한 내진판정지표 스펙트럼

(Oo-S3-80 : Origin-oriented, $A_{MAX}=80gal, \mu=10, F=1.0$) (Oo-S3-120 : Origin-oriented, $A_{MAX}=120gal, \mu=10, F=1.0$)

한계소성률 $\mu=10$ 에 필요로 하는 최소 균열내력 P_c 를 입력지진동에 대한 비로써 나타낸 것이고, 인성지표(F)는 내진진단기준의 전단파괴 건물에 해당하는 값으로 $F=1.0$ 이다.

4.3 해석 결과

그림3~그림14로부터, 다음과 같은 사실을 알 수 있다.

- (1) 지진구역 I 에서, 한계소성률에 필요한 최대 E_s 값은 약 0.3정도를 나타내었다(그림 3, 5, 7, 9, 11, 13).
- (2) 지진구역 II에서, 한계소성률에 필요한 최대 E_s 값은 약 0.45정도를 나타내었다(그림 4, 6, 8, 10, 12, 14).
- (3) 지진구역 I 에 필요로 하는 내진판정 기본지표는 지진응답해석에 의한 최대응답성상을 토대로 판단한다면, $E_s=0.3$ 으로 설정하는 것이 타당하리라 사료되지만, 공학적인 판단에 근거하여 본 연구에서는 최대값의 약 80%정도를 응답해석의 신뢰구간으로 판단하여, $E_s=0.25$ 를 내진판정기본지표로 설정한다. 한편, 상기의 지진구역 I 과 동일한 개념으로 지진구역 II에 필요로 하는 내진판정기본지표를 본 연구에서는 $E_s=0.35$ 로 설정한다(일본의 경우는 0.6).

5. 결론

본 연구에서는 일본의 내진진단기준을 적용하여 국내 실정에 맞는 내진성능의 평가기법을 제안한 문헌[1]의 연구결과를 바탕으로, 현행의 국내 내진설계법에 의하여 건설되는 건축물과 동등한 수준의 내진성능을 확보할 수 있도록 내진설계법에서 규정하는 내력수준에 적합한 구조내진성능지표(I_{50})를 평가·검증하여, 이것을 토대로 국내 실정에 적합한 내진성능 판정지표값을 설정하였다. 이상의 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 국내의 지진활동을 적절하게 나타낼 수 있는 피해지진 자료는 충분하지 못하기 때문에 본 연구에서는 국내의 지진활동, 즉 내진기준에서 설정한 지역계수를 적절하게 나타낼 수 있는 지진파를 선정하여 요구내력비 스펙트럼을 이용하여 국내 실정에 적합한 내진판정 기본지표를 제안하였다.
- (2) 본 연구에서는, 총 12개 해석 케이스에 대하여 내진판정지표 스펙트럼을 작성하였다. 그 결과, 한계소성률에 필요한 최대 E_s 값은 지진구역 I 에서 약 0.3, 지진구역 II에서 약 0.45정도가 산정되었다. 본 연구에서는 최대값의 약 80%정도를 응답해석의 신뢰구간으로 판단하여, 지진구역 I 에서는 $E_s=0.25$, 지진구역 II에서는 $E_s=0.35$ 로 설정하였다.

본 연구에서는 요구내력비 스펙트럼의 이론을 이용하여 국내 실정에 적합한 내진판정 기본지표를 제안하였으나, 향후 현행의 내진설계법에 의하여 내진설계를 실시하고, 그 결과를 토대로 재 내진진단을 실시하여 본 연구에서 제안한 내진판정 기본지표의 적합성에 대한 비교·검토가 필요하다고 사료된다.

6. 감사의 글

본 연구는 2000년도 초대형구조시스템 연구센터의 “한국 철근 콘크리트 건물의 내진진단 및 내진보강 기법의 개발에 관한 연구” 및 2000년도 광운대학교 연구년에 의해 연구되었으며, 연구의 지원에 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

1. 이원호, 이강석, 최호, “수정 강도지표를 이용한 기존 철근콘크리트 건물의 내진성능 평가,” 한국지진공학회 춘계 학술발표 논문집, Vol.5, No.1, pp.256~265.
2. 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,” 東京大学建築学科博士学位論文, pp. 1~116, 1988.
3. 村上雅也, “耐震性能の評価法と判定値の設定,” 日本建築学会建築雑誌, Vol. 95, pp. 32~39, 1980.
4. 김상대, 김명환, 내진구조설계를 위한 스펙트럼의 이해, 새론.