

# 사회기반시설물의 내진설계기준 개선방향에 대한 고찰

## A Discussion on the Improvement of Seismic Design Criteria of Infrastructures

서형열<sup>1)</sup> · 박광순<sup>1)\*</sup> · 김익현<sup>2)</sup> · 김동수<sup>3)</sup>

Seo, Hyeong Yeol<sup>1)</sup> · Park, Kwang Soon<sup>1)\*</sup> · Kim, Ick Hyun<sup>2)</sup> · Kim, Dong Soo<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>한국시설안전공단, <sup>2)</sup>울산대학교 건설환경공학부, <sup>3)</sup>한국과학기술원 건설환경공학과

<sup>1)</sup>Korea Infrastructure Safety & Technology Corporation, <sup>2)</sup>University of Ulsan, <sup>3)</sup>Korea Advanced Institute of Science and Technology

### / A B S T R A C T /

This study reviews the status and validity of seismic design criteria (SDC) for major facilities in Korea, which are composed of performance criteria and technical standard. Various facilities with different seismic design response spectra are analyzed to identify their seismic performance and necessity of eventual retrofit. The results are used to derive improvement directions of SDC. It is also concluded that the technical standard should be improved after the revision of the performance criteria.

**Key words:** Seismic Design Criteria, Infrastructure, Performance Criteria, Technical Standard, Design Response Spectrum

## 1. 서론

국내 사회기반시설물 중 내진설계 개념이 처음으로 도입된 시설물은 건축물로서, 1962년에 제정된 「건축법」 제10조(구조내력) ①항에 “건축물은 ~ 지진, 기타 진동 및 충격에 대하여 안전한 구조를 가져야 한다.”라고 선언적으로만 규정되어 있을 뿐 적용대상과 지진하중 등 내진설계를 수행할 수 있는 구체적인 기준이 없어 유명무실한 상태였으나, 1988년에 「건축물의 구조기준 등에 관한 규칙」이 개정되면서 지진하중 및 지진구역, 내진설계 대상 등의 구체적인 내용이 추가되어 건축물의 내진설계가 의무화되었다[1]. 이후 고속철도(1991)와 도로교(1992), 댐(1993) 시설물에 대해서도 별도의 내진설계기준이 제정되거나 설계기준 개정을 통한 내진설계편이 추가되어 해당시설물의 내진설계가 의무화되었다[2-4].

이와 같이 국내 내진설계는 일부 주요시설물에서만 독자적으로 시행되어 왔으나, 1995년에 일본에서 발생한 효고현 남부 지진(일명 고베지진)을 계기로 큰 변화를 보였다. 효고현 남부 지진은 지진 활동성이 매우 낮다고 알려진 지역에서 발생하였으며, 이는 우리 국민과 정부에 큰 충격과 경각심을 일깨워 주었다[5]. 우리 정부는 국가적 차원에서 지진재해에 대비하기 위하여 1996년에 기존의 「풍수해대책법」을 「자연재해대책법」으로 전면

개정하고 내진설계 대상시설을 지정한 후, 소관 부처에게 내진설계기준을 설정하도록 조치하였다[1].

이에 건설교통부(현 국토교통부)에서는 소관시설물에 대하여 일관성 있는 내진설계 개념을 제공할 목적으로 1997년에 ‘내진설계기준연구(II)’를 수행하여, 사회 전체의 체계적인 내진안전성을 확보하고 성능에 대한 요구사항을 기술적인 사항과 분리하기 위해서 Fig. 1과 같이 내진설계기준을 ‘성능기준(Performance Criteria, 일명 상위 개념)’과 ‘기술기준(Technical Standard, 일명 하위 개념)’으로 이원화하는 방안이 제시되었으며, 모든 시설물에 공통적으로 적용할 수 있는 국내 특성이 고려된 하중 조건, 성능 요구 사항 등을 규정한 ‘성능기준’이 마련되었다[5]. 또한, ‘기술기준’은 ‘성능기준’에 기초하여 시설물별로 목표내진성능을 달성할 수 있는 기술적 절

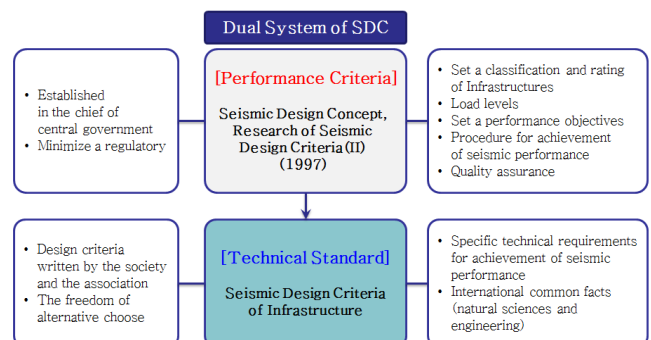


Fig. 1. System of Seismic Design Criteria in Korea

\*Corresponding author: Park, Kwang Soon

E-mail: parkks327@hanmail.net

(Received 26 March 2014; 23 June Accepted 23 June 2014)

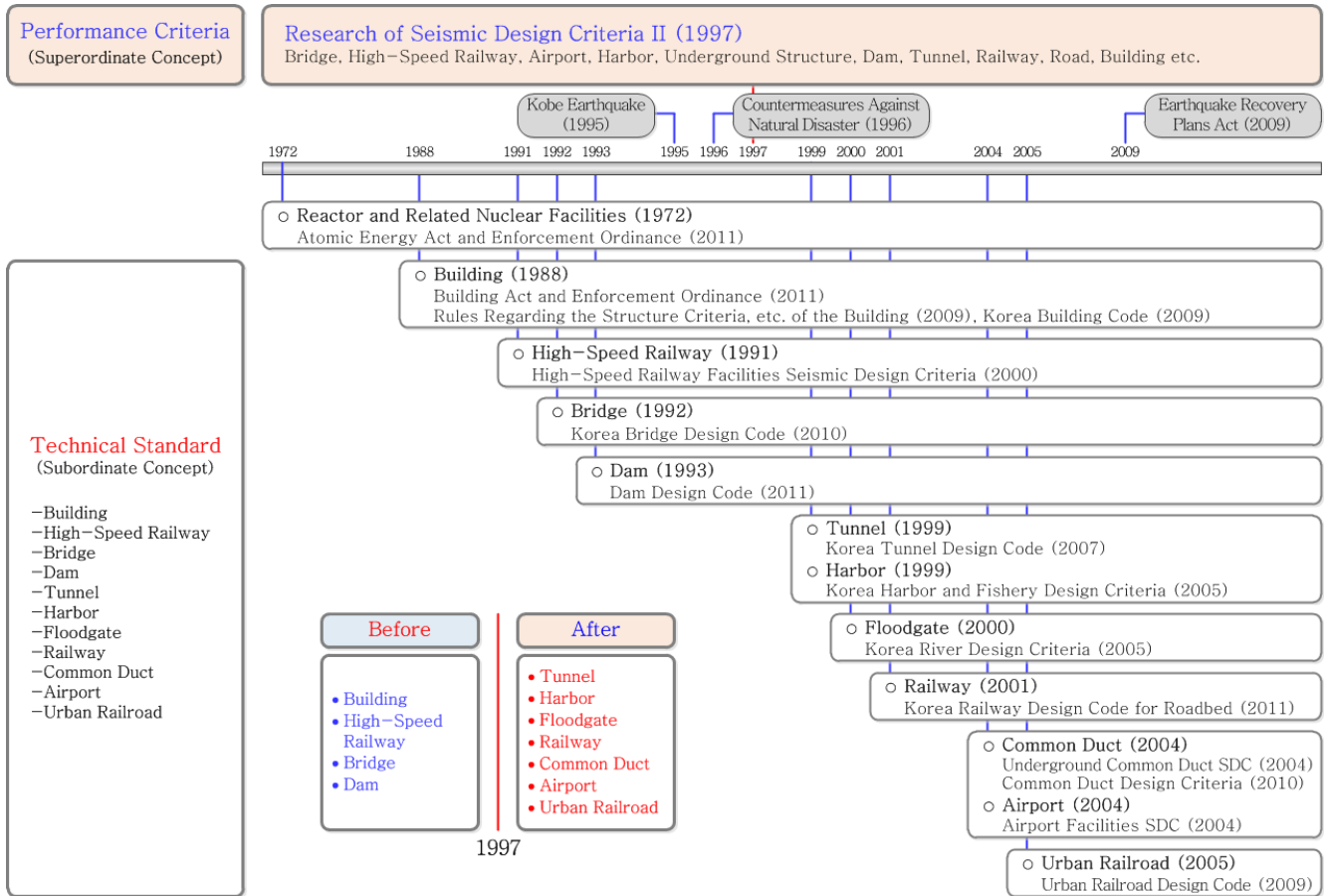


Fig. 2. Status of seismic design criteria of main facilities in Korea

차와 방법에 관한 구체적인 사항을 관련 학회나 협회에서 규정할 수 있도록 하여 Fig. 2와 같이 시설물별 내진설계기준이 제정되었으며, 시설물별 지속적인 개정이 이루어지고 있다[2-4, 6-14].

Fig. 2에 나타난 것과 같이 ‘기술기준’ 중 건축물(building), 고속철도(high-speed railway), 도로교(bridge) 및 댐(dam) 시설물의 내진설계기준은 ‘성능기준’이 마련되기 이전에 제정되었으며, 터널(tunnel), 항만(harbor), 수문(floodgate), 일반철도(railway), 공동구(common duct), 공항(airport) 및 도시철도(urban railroad) 시설물의 내진설계기준은 ‘성능기준’이 마련된 이후에 제정되었다. ‘성능기준’은 건설교통부 소관시설물에 대해 일관성 있는 내진설계 개념을 제공하기 위해 마련되었으나 관련 법률에 의한 강제성을 갖지 못해 ‘성능기준’이 마련되기 이전부터 내진설계기준이 제정되어 있던 건축물과 교량 같은 몇몇 시설물은 제정 당시의 개념을 유지한 상태에서 정비되어 ‘성능기준’과 상이한 내용이 다수 존재한다. 반면에 ‘성능기준’이 마련된 이후에 제정된 시설물의 내진설계기준은 ‘성능기준’에 부합되도록 정비되어왔다.

또한, 시설물별 내진설계기준에 제시된 상세규정은 관련 연구의 부족으로 내진설계기준별로 상충되는 사항이 다수 존재하므로 최신의 연구성과를 반영하여 합리적인 수정·보완 등의 재정비가 요구된다.

이에 본 연구에서는 국내의 주요시설물 중 국토해양(국토교통부와 해양수산부를 통합하여 명명) 소관시설을 중심으로 내진설계기준 현황을 분석하고 외국의 내진설계기준과 최신 연구동향을 바탕으로 적정성 검토를 수행하여 향후 내진설계기준의 개선방향을 제시하였다. 또한 시설물별 내진

설계기준에 상이하게 제시되어 있는 설계응답스펙트럼이 구조물의 내진성능평가 및 보강방안 수립에 미치는 영향을 예제해석을 통해 파악하였으며, 이에 대한 개선방향을 제시하였다.

## 2. 국내 내진설계기준 체계

### 2.1 성능기준[5]

‘내진설계기준연구(Ⅱ)’를 수행하여 마련한 ‘성능기준’에는 모든 시설물에 공통적으로 적용되는 내진성능목표, 설계지진운동수준, 지진하중 산정을 위한 표준설계응답스펙트럼 등의 핵심사항이 규정되어 있다.

#### 2.1.1 내진등급 및 내진성능수준

시설물의 내진등급(seismic grade)은 시설물의 중요도에 따라 내진Ⅱ등급(Ⅱ), 내진Ⅰ등급(Ⅰ)과 내진특등급(S)의 3가지로 분류되며, 시설물별 구체적인 분류기준은 해당 기술기준에서 규정하도록 되어 있다.

또한, 시설물은 기능수행(SL; Serviceability Limit)과 붕괴방지(CP; Collapse Prevention)의 2가지 내진성능수준을 만족하는 설계가 이루어지도록 되어 있다. 이때, 기능수행은 설계지진시 시설물에 발생하는 변형이나 손상이 그 시설물의 기능을 차질 없이 수행할 수 있는 범위내로 제한되는 성능수준을, 붕괴방지는 설계지진시 시설물에 상당한 변형이나 손상이 발

생활 수는 있지만 그 수준과 범위는 시설물이 붕괴되거나 손상으로 인하여 대규모 피해가 초래되는 것을 방지할 수 있는 성능수준을 의미한다. 각 성능 수준의 구체적인 정의는 해당 시설물에서 규정하도록 되어 있다.

### 2.1.2 내진성능목표

시설물은 내진등급별로 재현주기(return period)를 갖는 설계지반운동에 대하여 내진성능수준을 만족하는 설계가 이루어지도록 Table 1과 같이 내진성능목표(Target seismic performance)가 설정되어 있다.

### 2.1.3 설계지반운동

설계지반운동은 부지 정지작업이 완료된 지표면에서의 자유장 운동으로 정의되어 있으며, 국지적인 토질조건, 지질조건과 지표 및 지하 지형이 지반운동에 미치는 영향을 포함하도록 되어 있다. 이를 위한 지반의 분류는 전단파속도와 표준관입시험 N값, 비배수 전단강도에 따라  $S_A, S_B, S_C, S_D, S_E$  및  $S_F$ 의 6종으로 분류되어 있다.

설계지반운동수준은 지진구역계수( $Z$ )와 위험도계수( $I$ )의 곱으로 얻어지며, 지진구역은 지진위험지도 해석결과에 근거하여 2개의 구역으로 구분되어 있으며, 각 지진구역에서의 평균재현주기 500년 지진지반운동에 해당하는 지진구역계수는 구역 I에서는 0.11, 구역 II에서는 0.07이다. 위험도계수는 평균재현주기별 최대유효지반가속도의 비를 의미하며, 500년을 기준으로 재현주기별로 보정된 값이 주어진다.

설계지반운동의 특성은 기본적으로 응답스펙트럼으로 표현되며, 5% 감쇠비에 대한 표준설계응답스펙트럼은 Fig. 3과 같이 정의되어 있다. Fig. 3에서 표준설계응답스펙트럼의 완전한 결정을 위해 요구되는 지진계수  $C_a$

와  $C_b$ 는 지반종류에 따라 각각 주어진다.

또한, 설계지반운동으로 가속도 시간이력 및 인공가속도 시간이력을 적용할 수 있는 상세항목도 기술되어 있다.

## 2.2 국가성능기준(안)[16]

지난 30여년간 대규모 지진이 빈번하게 발생하였으며, 이중 내진설계가 잘 수행된 국가에서 발생한 Loma Prieta 지진(1989), Northridge 지진(1994), 효고현 남부 지진(1995) 등의 피해특성을 살펴보면, 지진에 의한 인명피해는 적어도 시설물의 손상에 따른 과도한 재산피해가 발생하여 복구에 많은 어려움을 겪은 것으로 확인되었다. 우리나라도 지속적으로 도시화가 확대되고, 이에 따른 기반시설물의 증가 및 인구 밀집으로 지진에 대한 취약도가 점차 증가되고 있으며, 무엇보다 기존시설물의 불확실한 내진성능으로 인해 지진취약도가 가중되고 있다. 현재 우리나라 내진설계의 기본 목표는 인명보호이기 때문에 지진이 발생하여 가옥, 건물 및 사회기반시설이 대규모로 붕괴되는 경우에는 사회기능을 조속히 회복하기 어려워 치명적인 국가재난으로 이어질 수 있다. 따라서 기본목표인 인명보호 뿐만 아니라 조속한 사회기능 회복을 위한 안전장치가 철저히 요구된다. 이에 시설물의 내진성능목표를 지진피해를 제어할 수 있는 내진성능으로 개선할 필요가 있다. 하지만 시설물의 지진피해수준을 제어할 수 있도록 하는 내진성능 목표는 현 내진설계 기술수준으로 이를 구체화하고 현실화할 수 없는 시설물도 다수 존재한다. 따라서 ‘국가성능기준(안)’에서는 기존의 기능수행과 붕괴방지를 기본으로 하고 시설물 관리주체에 따라 필요하다고 판단되는 경우에 시설물의 지진피해수준을 제어할 수 있는 내진성능목표에 대해 추가적으로 검토할 수 있도록 되어 있다.

Table 1. Target Seismic Performance in Performance Criteria

Design Earthquake	Performance Level	SL	CP
	Average Return Period(yr)		
	50	II	
	100	I	
	200	S	
	500		II
	1,000		I
	2,400		S

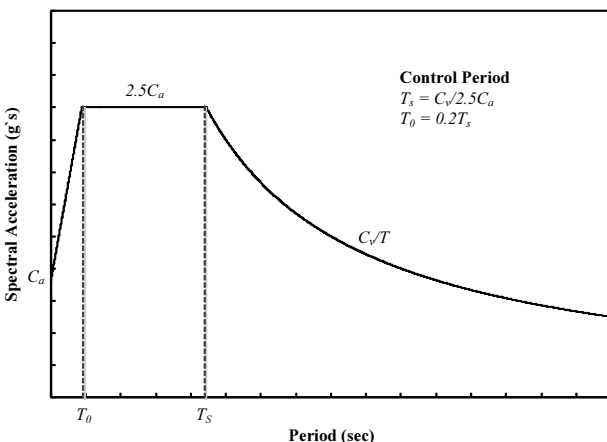


Fig. 3. Standard Design Response Spectrum

### 2.2.1 내진등급 및 내진성능수준

시설물의 내진등급은 ‘성능기준’과 동일하게 3가지 등급으로 분류되어 있으며, 내진성능수준은 기능수행과 붕괴방지에 즉시복구(IO; Immediate Occupancy)와 인명보호(LS; Life Safety)를 추가하여 시설물의 중요도에 따라 요구되는 내진성능수준을 만족하는 설계가 이루어지도록 규정되어 있다. 이때, 기능수행과 붕괴방지는 ‘성능기준’과 동일한 의미를 가진다. 즉 시복구는 설계지진시 시설물에 발생한 변형이나 손상이 제한적이어서 단기간 내에 즉시 복구되어 원래의 기능을 회복할 수 있는 성능수준을, 인명보호는 설계지진시 구조물이나 시설물에 상당한 변형이나 손상이 발생할 수는 있지만 이로 인하여 시설물에 상주하는 인원 또는 시설물을 이용하는 인원에 인명손실이 발생하지 않는 성능수준을 의미한다. 각 성능수준의 구체적인 정의는 해당 시설물에서 규정하도록 되어 있다.

### 2.2.2 내진성능목표 및 설계지반운동

시설물은 내진등급별로 평균재현주기를 갖는 설계지반운동에 대하여 내진성능수준을 만족할 수 있는 설계가 이루어지도록 Table 2와 같이 내진성능목표가 설정되어 있다. 이때, 시설물은 기능수행과 붕괴방지의 내진성능목표를 기본으로 하며, 필요시 즉시복구와 인명보호에 대해 추가적으로 검토하도록 규정되어 있다.

**Table 2. National Target Seismic Performance**

Design Earthquake	Performance Level	SL	IO	LS	CP
	Return Period(yr)	(Minor)	(Moderate)	(Extensive)	(Complete)
	50	II			
	100	I	II		
	200	S	I	II	
	500		S	I	II
	1,000			S	I
	2,400				S

설계지반운동은 ‘성능기준’과 동일하다.

### 2.3 기술기준

2009년에 공포된 지진재해대책법(Earthquake Recovery Plans Act)[1]에서는 31개 시설에 대하여 내진설계기준을 설정하도록 규정하고

있으며, 이중 국토해양 소관시설은 건축물과 공항시설, 도로시설(road facilities), 철도시설, 고속철도, 배수갑문(tidal gate), 수문, 항만시설, 다목적댐(multi-purpose dam), 일반댐, 도시철도, 공동구, 궤도(tramway)의 총 13개 시설물이다. 국토해양 소관시설의 내진설계기준은 공항시설과 도시철도만 별도로 제정되어 있으며, 나머지 11개 시설물은 각 시설물별 설계기준에 내진설계편이 포함되어 있다.

국토해양 소관시설별로 내진설계 대상시설(target infrastructures)과 관련 법령(relevant acts), 설계기준(design criteria), 내진등급, 설계지진 가속도(design earthquake acceleration) 및 규모(design magnitude)를 Table 3에 정리하였다. Table 3의 설계지진가속도는 지진구역계수와 위험도계수에 의해 결정되는 상한 및 하한값의 범위로 나타내었으며, 설계지진 규모는 “최대지반가속도-진도 관계식”을 이용하여 설계지진가속도에 해당하는 진도를 구한 후 “진도-규모 관계식”을 통해 설계지반가속도에 해당하는 설계지진규모를 산정하였다. 이때 “최대지반가속도-진도 관계식”은 Wald et al.[17]와 Gutenberg and Richter[18], Trifunac and Brady[19]

**Table 3. The State of Seismic Design Criteria of Infrastructures**

No.	Target structures	Relevant Acts	Design Criteria	Seismic Grade	Design Earthquake Acceleration	Design Magnitude
1	Building	·Building Act ·Rules regarding the structure criteria, etc. of the building	Korea Building Code(88)	S, I, II	0.07~0.22g	5.1~6.5
2	Airport facilities	·Aviation Act	Korea Airport Facilities Seismic Design Criteria(04) Korea Building Code(88) Korea Bridge Design Code(92) Tunnel Design Code(99)			
3	Road facilities	·Road Act	Korea Bridge Design Code(92) Korea Tunnel Design Code(99)	I, II	0.07~0.154g	5.1~6.2
4	Railway facilities	·Framework Act on the Development of Railroad Industry ·Railroad Construction Act	Korea Railway Design Code(01) Korea Tunnel Design Code(99) Korea Building Code(88)			
5	High-Speed railway	·Railroad Construction Act	Korea Railway Design Code(01) Korea Tunnel Design Code(99) Korea Building Code(88)			
6	Tidal gate	·Act in the Public water Management and Reclamation ·Tide Embankment Management Act	Korea Harbor and Fishery Design Criteria(05)			
7	Floodgate (National stream)	·River Act	Korea River Design Criteria(05)			
8	Harbor facilities	·Harbor Act	Korea Harbor and Fishery Design Criteria(05) Korea Bridge Design Code(92) Korea Building Code(88)	S, I		
9	Multi-purpose dam	·Act on Dam Construction and Assistance, etc. to Surrounding Area	Korea Dam Design Code(93)			
10	Dam	·Other laws(dams over 15m and accessory structures)	Korea Dam Design Code(93)	I	0.098~0.154g	5.4~6.2
11	Urban railroad	·Urban Railroad Act	Korea Urban Railroad Seismic Design Criteria(05) Korea Tunnel Design Code(99) Korea Building Code(88)			
12	Common duct	·National Land Planning and Utilization Act	Korea Common Duct Design Criteria(04)			
13	Tramway	·Tramway Transportation Act	Equipment Criteria about Construction of Tramway Facilities(10)	II	0.07~0.11g	5.1~6.0

의 제안식을, “진도-규모 관계식”은 KMA[20] 제안식을 적용하였다.

“최대지반가속도-진도 관계식”

$$MMI = 2.20 \log PGA + 1.0 \quad (\text{Wald et al. - A; 1999}) \quad (1)$$

$$MMI = 3.66 \log PGA - 1.66 \quad (\text{Wald et al. - B; 1999}) \quad (2)$$

$$\log PGA = -0.5 + \frac{1}{3} MMI \quad (\text{Gutenberg \& Richter; 1956}) \quad (3)$$

$$\log PGA = 0.014 + 0.3 MMI \quad (\text{Trifunac \& Brady; 1975}) \quad (4)$$

“진도-규모 관계식”

$$M = 0.56 MMI + 1.73 \quad (\text{KMA; 2006}) \quad (5)$$

**Table 4.** Modified Mercalli Intensity scale [21]

MMI		Characteristics
I	Instrumental	Generally not felt by people unless in favorable conditions.
II	Weak	Felt only by a couple people that are sensitive, especially on the upper floors of buildings. Delicately suspended objects may swing slightly.
III	Slight	Felt quite noticeably by people indoors, especially on the upper floors of buildings. Many do not recognize it as an earthquake. Standing automobiles may rock slightly. Vibration similar to the passing of a truck. Duration can be estimated. Indoor objects may shake.
IV	Moderate	Felt indoors by many to all people, and outdoors by few people. Some awakened. Dishes, windows, and doors disturbed, and walls make cracking sounds. Chandeliers and indoor objects shake noticeably. The sensation is more like a heavy truck striking building. Standing automobiles rock noticeably. Dishes and windows rattle alarmingly. Damage none.
V	Rather Strong	Felt inside by most or all, and outside. Dishes and windows may break and bells will ring. Vibrations are more like a large train passing close to a house. Possible slight damage to buildings. Liquids may spill out of glasses or open containers. None to a few people are frightened and run outdoors.
VI	Strong	Felt by everyone, outside or inside; many frightened and run outdoors, walk unsteadily. Windows, dishes, glassware broken; books fall off shelves; some heavy furniture moved or overturned; a few instances of fallen plaster. Damage slight to moderate to poorly designed buildings, all others receive none to slight damage.
VII	Very Strong	Difficult to stand. Furniture broken. Damage light in building of good design and construction; slight to moderate in ordinarily built structures; considerable damage in poorly built or badly designed structures; some chimneys broken or heavily damaged. Noticed by people driving automobiles.
VIII	Destructive	Damage slight in structures of good design, considerable in normal buildings with a possible partial collapse. Damage great in poorly built structures. Brick buildings easily receive moderate to extremely heavy damage. Possible fall of chimneys, factory stacks, columns, monuments, walls, etc. Heavy furniture moved.
IX	Violent	General panic. Damage slight to moderate (possibly heavy) in well-designed structures. Well-designed structures thrown out of plumb. Damage moderate to great in substantial buildings, with a possible partial collapse. Some buildings may be shifted off foundations. Walls can fall down or collapse.
X	Intense	Many well-built structures destroyed, collapsed, or moderately to severely damaged. Most other structures destroyed, possibly shifted off foundation. Large landslides.
XI	Extreme	Few, if any structures remain standing. Numerous landslides, cracks and deformation of the ground.
XII	Catastrophic	Total destruction – everything is destroyed. Lines of sight and level distorted. Objects thrown into the air. The ground moves in waves or ripples. Large amounts of rock move position. Landscape altered, or leveled by several meters. Even the routes of rivers can be changed.

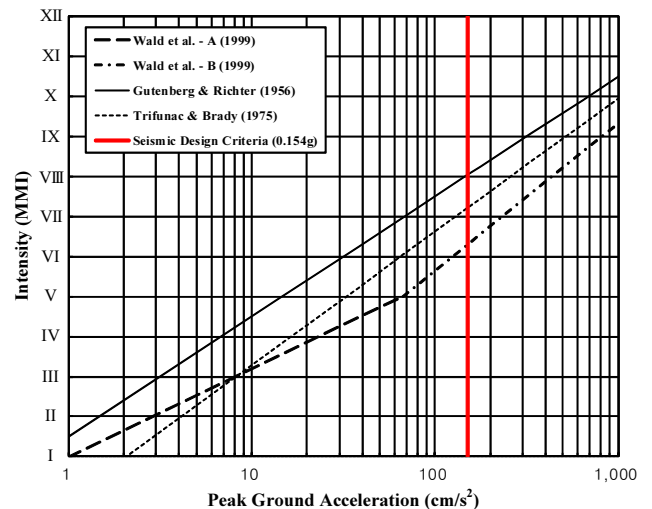
여기서, *PGA*는 최대지반가속도(Peak Ground Acceleration)로  $\text{cm/s}^2$  단위를 적용하고 있으며, *MMI*는 진도(수정 머칼리 진도 척도; Modified Mercalli Intensity scale, Table 4 참조), *M*은 규모이다.

이때, 지진의 크기를 설계지진가속도와 규모로 표현한 이유는 정부 관계자 및 국민들에게는 지진가속도의 의미가 낯설고 이해하기 쉽지 않아 크기를 가늠하는데 어려움이 있으므로, 진도나 규모라는 정량화된 등급으로 표현하여 누구나 쉽게 이해할 수 있도록 한 것이다.

“최대지반가속도-진도 관계식”을 이용하여 국내 붕괴방지수준의 설계지진가속도 0.154g에 해당하는 진도를 구하면 VI~VIII이며, “진도-규모 관계식”을 이용하여 진도 VIII에 해당하는 규모를 구하면 M6.2에 해당된다.

### 3. 내진성능목표 설정방법의 개선방향

국토해양 소관시설의 내진성능목표는 대부분의 시설물이 ‘성능기준’을 따르고 있으나, 일부 시설물만 독자적인 방법에 의해 설정하고 있다. ‘성능기준’에서는 설계지진으로서 내진성능수준과 시설물의 중요도에 따라 재현주기가 다른 2가지 내진성능목표를 설정하고 있다. 즉, 유럽이나 국제표준기구의 설계원칙과 동일하다[22-24]. 이와 같이 기준지진에 대해 하나의 대응 성능목표를 설정하게 되면 개별시설물에 대한 내진성능목표를 관리하기는 매우 수월하지만, 하나의 기준지진에 대한 도시 또는 국가차원의 피해수준을 예측하기는 어렵다. 이러한 문제점을 인식하여 ‘국가성능기준(안)’에서는 일본 건축기준법의 요구성능 매트릭스(4가지 재현주기의 설계지진과 건축물의 중요도에 따라 무피해, 계속 사용자, 보수 후 사용자 및 붕괴방지 와 같은 요구성능 정의)와 유사하게 내진성능목표를 제안하고 있다[16].



**Fig. 4.** PGA-Intensity Relationship

우리나라 시설물의 내진성능목표 설정과 관련하여 내진선진국의 최신 연구동향인 성능기반 내진설계법을 고려하여[23-25] 다음과 같이 국가(도시)수준의 내진성능목표를 먼저 설정하고, 이에 부합되는 개별시설물의 내진성능목표를 설정하는 것이 바람직하다.

- ◎ 국가(도시) 전체의 리스크 관리 차원에서 내진성능수준 설정
  - ▶ 사회 구성원이 공감하는 국가(도시)성능수준 고려
  - ▶ 지진피해 규모에 따른 복구자원 동원능력 및 대응능력 고려
  - ▶ 리스크 관리를 위한 지표 설정, 분석 및 평가, 대응방법 확립
- ◎ 국가(도시) 내진성능수준에 부합되는 시설물의 내진성능수준 설정
  - ▶ 시설물 상호간의 연계성을 고려한 성능수준 설정
  - ▶ 시설관리자(또는 소유주)의 요청에 따른 피해수준 제어가 가능한 성능수준 범위 설정
  - ▶ 시설관리자(또는 소유주)의 이해를 돕는 시설물의 성능수준 정량화 지표 개발
- ◎ 내진성능수준 확보여부를 평가하기 위한 해석방법 확립
  - ▶ 산정된 지진에 대한 피해 규모와 목표 국가(도시)성능수준의 부합성
  - ▶ 개별 시설물의 피해수준과 목표 내진성능수준 부합성

그렇지만 이와 같이 시설물의 내진성능목표를 설정하기 위해서는 향후 많은 연구가 진행되어야 할 것이다. 따라서 여기에서는 현재 외국에서 적용

되고 있는 내진성능목표를 참조하여 다음과 같은 개선방향을 제시하였다.

- ▶ 지진시 시설물의 과다한 손상에 따른 막대한 경제적 손실을 방지한다. 즉 구조물의 중요도에 따라 손상제어가 가능하도록 설정한다.
- ▶ 하나의 기준지진에 대해서 시설물 전반에 대한 피해예측이 가능하도록 설정한다.
- ▶ 차세대 성능기반 내진설계법의 기본개념을 적극적으로 반영할 수 있도록 유연성을 유지한다.

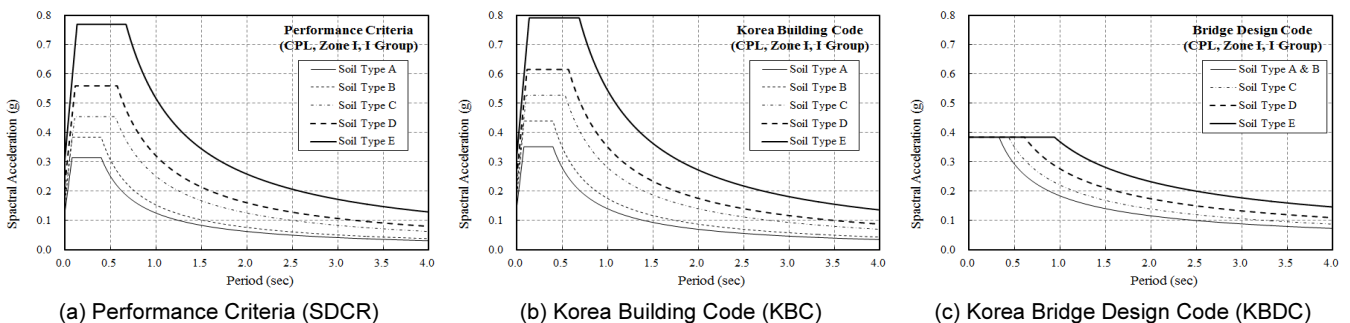
#### 4. 시설물별 내진설계기준 적정성 검토

국토해양 소관시설의 내진설계기준에 규정된 핵심사항을 검토하여 Table 5에 요약 정리하였다. 특이사항으로는 ‘성능기준’이나 다른 시설물의 내진등급은 재현주기 1,000년을 내진 I 등급으로, 재현주기 500년을 내진 II 등급으로 정의되어 있으나, 댐설계기준에는 재현주기 1,000년을 내진 특등급으로, 재현주기 500년을 내진 I 등급으로 정의되어 있다. 또한, 건축물의 내진성능목표는 즉시복구와 인명보호, 붕괴방지로 되어 있으며, 설계 지진이 ‘성능기준’이나 다른 시설물과 상이하게 재현주기 2,400년의 2/3로 정의되어 있다. 그리고 건축물과 도로교의 설계응답스펙트럼은 동일한 조건(지진구역 I, 내진 I 등급 및 붕괴방지 적용)에서 Fig. 5와 같이 ‘성능기준’과 상이하게 제시되어 있다.

국토해양 소관시설의 내진설계기준 체계는 ‘성능기준’과 ‘기술기준’으

**Table 5.** Comparison of Seismic Design Criteria of Infrastructures

Infrastructures	Design Criteria	Seismic Grade	Target Seismic Performance	Design Earthquakes (Return Period, yr)	Design Spectrum Conformance	Seismic Design Applied Year
-	Performance Criteria	S, I, II	SL / CP	50, 100, 200 / 500, 1,000, 2,400	-	1997
Road Bridge	Bridge Design Code	I, II	CP	500, 1,000	<b>different</b>	1992
Railway Bridge	Railway Design Code	I, II	CP	500, 1,000	<b>different</b>	1991
Tunnel	Tunnel Design Code	I, II	CP	500, 1,000	conformance	1999
Dam	Dam Design Code	<b>S, I</b>	CP	500, 1,000	conformance	1993
Floodgate	River Design Criteria	I, II	SL / CP	50, 100 / 500, 1,000	conformance	2000
Tidal gate	Harbor and Fishery Design Criteria	I, II	SL / CP	50, 100 / 500, 1,000	conformance	2005
Harbor	Harbor and Fishery Design Criteria	I, II	SL / CP	50, 100 / 500, 1,000	conformance	1999
Airport	Airport Facilities Seismic Design Criteria	S, I, II	SL / CP	50, 100, 200 / 500, 1,000, 2,400	conformance	2004
Building	Korea Building Code	S, I, II	<b>IO / LS / CP</b>	<b>2/3 of 2,400</b>	<b>different</b>	1988
Common Duct	Common Duct Design Criteria	I	CP	1,000	conformance	2004
Tramway & Cableway	Equipment Criteria about Construction of Tramway Facilities	II	CP	500	conformance	2009



**Fig. 5.** Comparison of Design Response Spectrum (CPL, Zone I, I Group)

로 이원화되어 있으며, 이러한 체계는 적정하다고 판단된다. 또한 ‘성능기준’에 제시되어 있는 설계지진가속도는 아직까지 지진피해가 없는 우리나라의 현실을 고려할 때 증가시키는 것은 바람직하지 않다고 판단된다. 다만, 세부적으로 ‘성능기준’과 상이한 ‘기술기준’은 개정할 필요성이 있으며, 향후 우리나라에서 발생하는 규모 5.0이상의 지진 예측자료가 누적되어 통계 분석이 가능해 진다면 우리나라 특정(중약진 지역)을 고려한 설계기준이 제정될 수 있을 것으로 사료된다.

‘성능기준’의 지진위험지도는 NEMA[26]에서 2013년 12월에 ‘국가 지진위험지도 및 지진구역·지진구역계수’를 개정하여 공표하였으므로 각 시설물별 ‘기술기준’에서는 이를 따라 개정되어야 하며, 내진성능목표는 ‘3. 내진성능목표 설정방법의 개선방향’에 제시된 바와 같이 차세대 성능기반 내진설계법을 고려하여 기존의 2가지 목표에서 4가지 목표로 세분화하는 것이 적정하다고 판단된다.

‘성능기준’의 지진위험지도와 내진성능목표 등이 확립되면, 이에 맞추어 설계응답스펙트럼도 통일되게 개정되어야 하며, 각 시설물별 ‘기술기준’도 이에 부합되게 개정하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

또한, 국토해양 소관시설의 내진설계 규모로 사용하고 있는 값들은 시설물별 계산과정에 적용한 제안식이 상이하여 동일한 설계지진가속도를 갖고 있음에도 다른 규모로 책정되어 혼란을 초래하고 있으므로 Table 6과 같이 개선하여 통일할 필요가 있다.

### 5. 설계응답스펙트럼 상이에 따른 문제점 검토

사회기반시설물의 ‘성능기준’과 ‘기술기준’에 제시된 설계응답스펙트럼을 살펴보면, Fig. 6과 같이 건축물과 도로교의 설계응답스펙트럼은 ‘성능기준’과 상이하게 제시되어 있다. 특히 도로교의 설계응답스펙트럼은 지

Table 6. Magnitude of Seismic Design Criteria of Infrastructures

Division	Current	Improvement
Dam, Floodgate, Tidal gate	6.1~6.3	5.1~6.2
Road	6.3	5.1~6.2
Railway, High-Speed Railway	6.0	5.1~6.2
Harbor	6.3~6.5	5.1~6.2
Airport	5.7~6.5	5.1~6.5
Building	5.5~6.0	5.1~6.5
Common Duct, Urban Railroad	6.0~6.3	5.4~6.2
Tramway	-	5.1~6.0

반종류와 상관없이 최대값을 2.5A로 제한하고 있어 ‘성능기준’이나 건축물의 설계응답스펙트럼과는 확연한 차이를 보이며, 지반상태가 좋지 않을수록 더 큰 차이를 보이고 있다.

이러한 설계응답스펙트럼의 차이가 구조물의 내진성능평가 및 보강설계에 미치는 영향을 파악하기 위해 KISTEC[27]의 평가요령에 제시된 평가예제 PSCI교(C.1)와 STB교(C.3)를 대상으로 내진성능평가를 수행한 후 교량 특성과 평가결과를 고려하여 보강설계를 수행하였다. 해석대상교량들의 형상과 제원은 Fig. 7 및 Table 7과 같으며, 상세제원은 평가요령에 명기된 값을 적용하였다. 내진성능평가 및 보강설계에 적용한 지진해석방

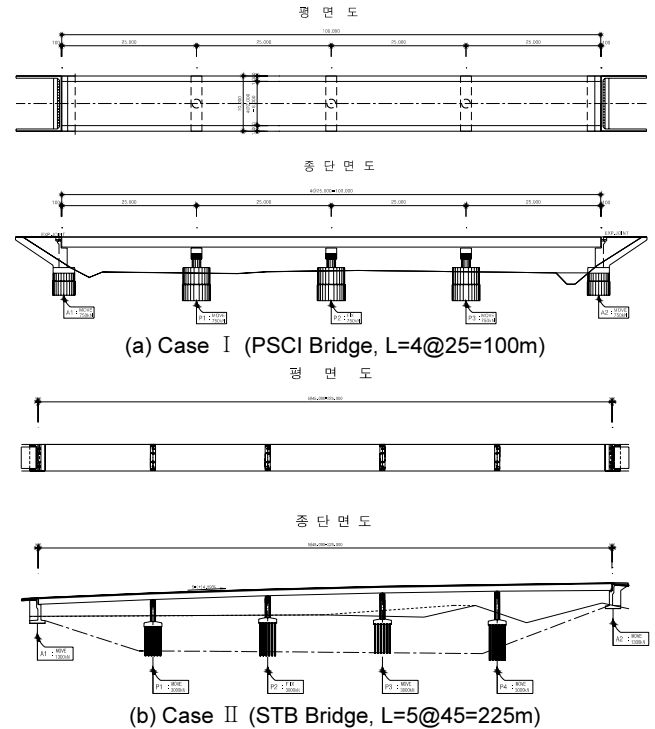


Fig. 7. Analysis Model

Table 7. Bridge Details

Case	Total Length	Superstructure Type	Fixed Pier (height)	Total Weight	Longitudinal Period
Case I	4@25=100m	PSCI	P2(H=3.45m)	17,660kN	0.476sec
Case II	5@45=225m	STB	P2(H=8.33m)	30,736kN	1.161sec

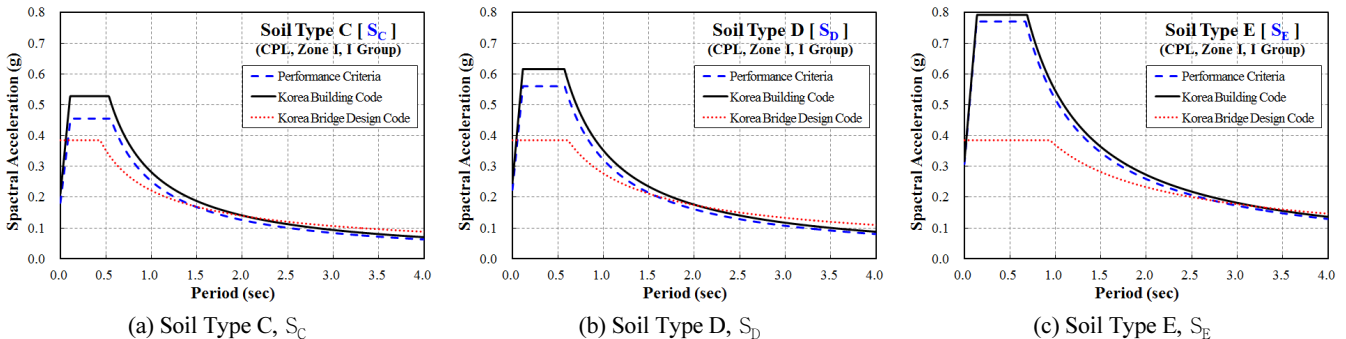


Fig. 6. Design Response Spectrum by Soil Types (CPL, Zone I, I Group)

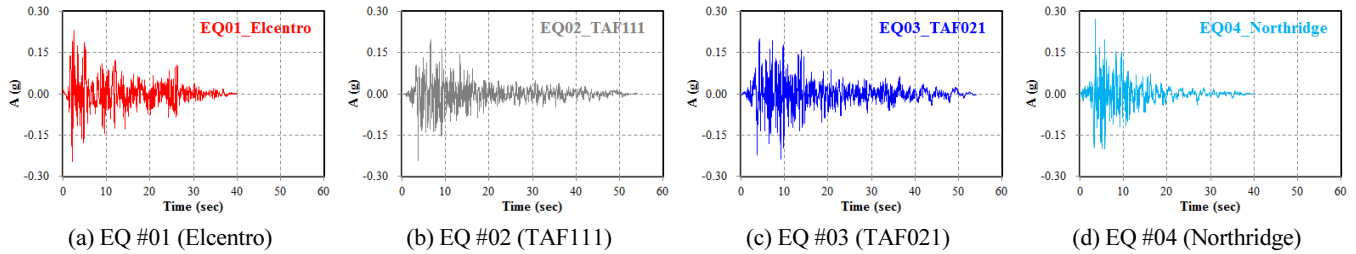


Fig. 8. Seismic Waves (SDCR -  $S_D$ )

Table 8. Seismic Assessment and Retrofitting Results

Case	Soil Type	Assessment Result		Retrofitting Result						
		Fixed Pier	Bridge Bearing	Retrofit Measure	Capacity, kN (Lead Diameter, mm)			Period, sec		
					SDCR	KBDC	KBC	SDCR	KBDC	KBC
Case I	$S_C$	NG	OK	Rubber Bearing	750	750	1,000	0.812	0.812	0.733
	$S_D$	NG	OK	Rubber Bearing (G=1.15)	1,350	1,000	1,750	0.719	0.733	0.650
	$S_E$	NG	OK		N.A.	1,000	N.A.	-	0.733	-
Case II	$S_C$	NG	NG	LRB	3kA (120)	3kA (120)	3kA (120)	1.333	1.333	1.333
	$S_D$	NG	NG		3kA (120)	3kA (120)	3kA (120)	1.333	1.333	1.333
	$S_E$	NG	NG		3kB (175)	3kA (160)	3kB (175)	1.196	1.195	1.196

\* G : Shear Modulus of Elasticity (MPa)

\* N.A. : Not Applicable

\* Rubber Bearing Size :

- 750kN - 200×400mm, 4 layer
- 1,000kN - 250×400mm, 4 layer
- 1,350kN - 300×400mm, 3 layer
- 1,750kN - 300×500mm, 3 layer

\* LRB Size :

- 3kA(3,000kN Type A) - 500×500mm, 6 layer
- 3kB(3,000kN Type B) - 500×550mm, 8 layer

법은 각 기준에서 제시하고 있는 응답스펙트럼을 이용하여 다중모드스펙트럼해석을 기본으로 수행하였으며, 이때 지반종류는 암반지반( $S_A$  및  $S_B$  지반)을 제외하고, 토사지반인  $S_C$  (Very Dense Soil),  $S_D$  (Stiff Soil) 및  $S_E$  (Soft Soil)에 대하여 적용하였다 (Fig. 6 참조). 다만, 보강설계시 지진격리장치를 적용할 경우에는 Fig. 8과 같은 지진파를 이용하여 시간이력해석을 수행하였다. 지진파는 ‘도로교설계기준’에서 제시하는 방법 중 실제 기록된 지진운동을 설계응답스펙트럼에 부합되도록 보정하는 방법으로 서로 다른 특성을 갖는 4쌍의 지진파를 작성하였다.

지진해석을 수행하여 얻은 고정단 교각 하부의 부재력을 Fig. 9와 10에 나타내었다. 그리고 이를 토대로 수행한 내진성능평가 및 보강설계 결과를 Table 8에 정리하였다. 이때 내진성능평가는 고정단 교각부(Fixed Pier)와 받침부(Bridge Bearing)만을 평가하였으며, 기초부(Foundation)는 지반정수 등의 불확실성이 크기 때문에 제외하였다.

Fig. 9와 10의 지진해석 결과를 살펴보면, Case I의 경우에는 교축방향 주기가 0.476초로 ‘도로교설계기준’을 적용하면 지반상태가 변화더라도 2.5A의 제한구간에 해당되어 부재력의 변화가 거의 없지만 ‘성능기준’과 ‘건축구조기준’을 적용하면 지반상태가 안 좋을수록 부재력이 증가하는 경향을 보였다. Case II의 경우에는 교축방향 주기가 1.161초로 설계기준 모

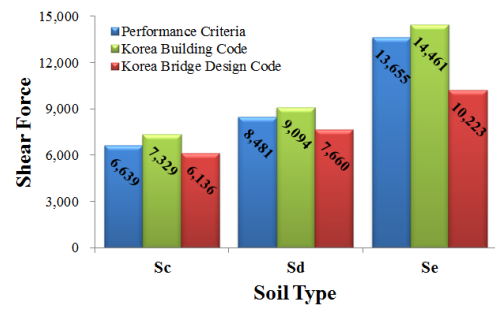
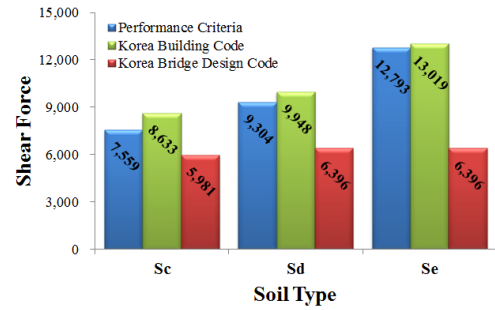


Fig. 9. Bottom Shear Force of Fixed Pier

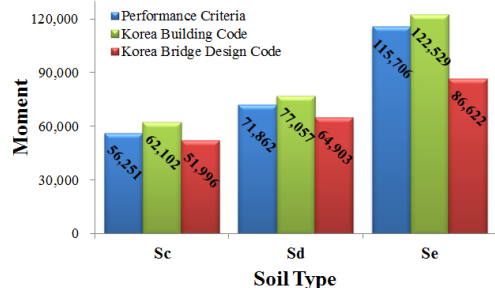
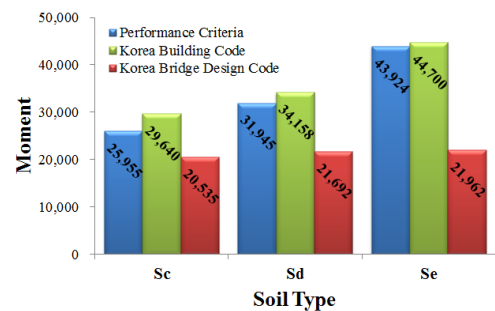


Fig. 10. Bottom Moment of Fixed Pier



두 가속도가 감소하는 구간에 위치해 지반상태가 안 좋을수록 부재력이 유사하게 증가하는 경향을 보이며,  $S_E$  지반을 적용하였을 때에는  $S_C$  와  $S_D$  지반을 적용하였을 때보다 설계기준별 부재력이 다소 큰 차이를 보이고 있다. Table 8의 내진성능 평가결과를 살펴보면, 고정단 교각부 및 받침부에서 내진성능이 부족한 것으로 평가되어 교량 특성 등을 고려하여 Case I 에는 탄성받침으로 교체하는 방안을, Case II 에는 LRB(Lead Rubber Bearing, 납고무받침)로 교체하는 방안을 내진보강대책으로 적용하였다. Case I 보강결과를 살펴보면, ‘도로교설계기준’은 지반종류와 무관하게 받침용량이 1,000kN 이내에서 충분한 보강효과를 보이나, ‘성능기준’이나 ‘건축구조기준’은 지반이 안 좋을수록 ‘도로교설계기준’보다 큰 용량의 탄성받침이 필요하였다. 특히  $S_E$  지반의 경우는 탄성받침으로는 보강이 불가능하여 지진력리장치를 통한 보강이 필요하게 되므로 보강비용의 증가가 불가피하게 된다. Case II 보강결과를 살펴보면, 지반이 안 좋을수록 LRB의 크기나 납심의 면적이 증가하게 되므로 보강비용이 증가는 하지만 설계기준별 차이는 작게 나타났다.

위의 결과를 토대로 우리나라와 같이 대부분 지역이  $S_C$  나  $S_D$  지반에 해당되는 경우는 Case II 와 같이 주기가 1초를 넘는 구조물에 대해서 설계기준이 다르게 적용되더라도 부재력은 유사하게 발생하므로 보강방안 수립에는 큰 차이가 없다. 하지만 Case I 과 같이 주기가 짧은 구조물( $T \leq 0.5$  초)은 적용되는 설계기준이 다르게 되면 응답 및 보강방안에서 큰 차이를 보이게 된다. 그러므로 ‘성능기준’에서 국내의 지진환경과 설계지진 및 지반특성 등을 고려하여 새로운 설계응답스펙트럼을 정의하고, 이를 모든 시설물에 적용하기 위한 노력이 필요하다.

## 6. 기술기준의 개선방향 고찰

국토해양 소관시설의 ‘기술기준’ 현황을 분석하고 적정성 검토를 수행하여 도출된 문제점을 토대로 개선방향을 제시하였다.

### ① 건축물

- ‘성능기준’ 제정 이전에 내진설계기준이 제정되었으며, 기본적으로 IBC를 준용하고 있음[28].
- 일부 내용은 ‘성능기준’과 일치하나, 설계응답스펙트럼이 상이하게 적용되고 있음.
- 지반증폭계수도 IBC를 준용하였으나  $S_E$  지반의 경우 IBC 보다 큰 지반증폭계수가 적용되었으므로 이에 대한 개정이 필요.

### ② 교량(도로·철도·고속철도·도시철도·공항·항만시설 등)

- ‘성능기준’ 제정 이전에 내진설계기준이 제정되었으며, 기본적으로 AASHTO를 준용하고 있음[29].
- 일부 내용은 ‘성능기준’과 일치하나, 설계응답스펙트럼이 상이하게 적용되고 있음.
- AASHTO도 2010년부터 IBC와 동일하게 설계응답스펙트럼을 개정하였으므로 통일된 설계응답스펙트럼으로 개정 필요.

### ③ 터널(도로·철도·고속철도·도시철도·공동구 등)

- ‘터널설계기준’, ‘철도설계기준’은 ‘도로교설계기준’의 설계응답스펙트럼을 적용하여 ‘성능기준’과 상이하고, ‘도시철도 내진설계

기준’ 및 ‘공동구 설계기준’에서는 ‘성능기준’과 동일한 설계응답스펙트럼을 적용하고 있으며, 각각의 ‘기술기준’에서 조금씩 상이하게 개정됨.

- 터널 구조상 굴착식과 개착식 공법에 따라 구조적 특성이 상이하기 때문에 이를 구분하여 설계될 수 있도록 개정 필요.

### ④ 다목적 댐, 일반 댐

- 설계응답스펙트럼은 ‘성능기준’과 부합되지만, 내진등급에 있어 ‘성능기준’과 달리 재현주기 1,000년을 내진특등급, 재현주기 500년을 내진 I 등급으로 적용하고 있으므로 ‘성능기준’이나 다른 시설물과 통일된 표기로 개정 필요.

### ⑤ 공항시설

- 비행장시설(활주로, 유도로, 계류장)은 액산화만 평가하므로 ‘구조물기초 설계기준’을 준용하는 것으로 개정하는 것이 바람직함[30].
- 건축물(여객터미널, 관제탑, 화물터미널)은 ‘건축구조기준’의 중요도등급에 포함하여 ‘건축구조기준’을 준용하는 것으로 개정하는 것이 바람직함.
- 교량은 ‘도로교설계기준’을, 지중구조물은 ‘터널설계기준’을 준용하는 것으로 개정하는 것이 바람직함.

### ⑥ 항만시설물

- 교량은 ‘도로교설계기준’을, 여객터미널은 ‘건축구조기준’을 준용하고 있음.
- 안벽 등의 접안시설과 부두시설 등은 ‘성능기준’과 부합됨.
- 건축물(여객 및 화물터미널)은 ‘건축구조기준’의 중요도등급에 포함하여 ‘건축구조기준’을 준용하는 것으로 개정하는 것이 바람직함.

### ⑦ 배수갑문

- 방조제만이 국토해양 소관시설이고, 다른 시설물은 농림축산식품부 소관시설이며 ‘성능수준’과 부합됨.

### ⑧ 수문(국가하천)

- 본류를 횡단하거나 본류로 유입되는 지류를 횡단하여 제방을 분리시키는 형태로 설치한 문짝을 가진 구조물만이 내진설계대상임.
- 통문과 통관은 내진설계 제외시설물이나 일반적으로 수문이라 하면 통문, 통관을 포함하여 지칭하므로 용어 정의부터 개정 필요.

### ⑨ 궤도

- 사면, 옹벽, 기초구조물은 ‘건설공사비탈면 설계기준’과 ‘구조물기초설계기준’을, 지주, 정거장, 건축물은 ‘건축구조기준’을 준용하고 있으며, 지반분류 등 부분적으로 상이한 규정은 개정 필요.

### ⑩ 철도역사

- 건축물(철도역사 등)은 ‘건축구조기준’의 중요도등급에 포함하여 ‘건축구조기준’을 준용하는 것으로 개정하는 것이 바람직함.

## 7. 결론 및 고찰

본 연구에서는 국내 주요시설물의 내진설계기준 현황을 분석하고 적정성 검토를 수행하였다. 이를 토대로 ‘성능기준’의 내진성능목표 설정방법과 설계지진가속도, 지진위험지도 등에 대하여 내진선진국의 설계기준 및 최신 연구동향을 바탕으로 개선방향을 제시하였다. 그리고 ‘기술기준’은

시설물별 내포하고 있는 주요 문제점과 향후 개선방향을 제시하였다. 또한, 시설물별 내진설계기준에 상이하게 제시되어 있는 설계응답스펙트럼이 구조물의 내진성능평가 및 보강방안 수립에 미치는 영향을 예제해석을 통해 파악하였으며, 이에 대한 개선방향도 제시하였다.

이를 위해서는 공통으로 적용되는 ‘성능기준’을 우선적으로 개선한 후, 이에 부합되게 ‘기술기준’을 개선하는 것이 바람직하다. 또한, ‘성능기준’이 제대로 확립되기 위해서는 국가재난을 총괄하는 소방방재청과 주요시설물의 대부분을 관리하는 국토교통부와 해양수산부의 긴밀한 협력이 필요하며, ‘기술기준’의 개선은 시설물별 관리주체의 담당자(부서)가 필요성과 목적을 명확히 인지한 상태에서 향후 내진설계기준 개정시 이에 대한 관리가 필요할 것으로 사료된다.

**/ 감사의 글 /**

본 연구는 2012년도 국토해양부(현 국토교통부) 건설안전과의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

**/ REFERENCES /**

1. Ministry of Government Legislation. Available from: <http://www.law.go.kr/main.html>
2. Korea High-Speed Railway Construction Corporation, Seismic Design Code for Korea High-Speed Railway Facilities, c2000.
3. Ministry of Land, Transportation and Maritime Affairs, Korea Bridge Design Code, Korea Road and Transportation Association, c2010.
4. Ministry of Land, Transportation and Maritime Affairs, Korea Dam Design Code, Korea Water Resources Association, c2011.
5. Ministry of Construction and Transportation, Research of Seismic Design Criteria (II), Earthquake Engineering Society of Korea, c1997.
6. Ministry of Land, Transportation and Maritime Affairs, Korea Railway Design Code for Roadbed, Korea Rail Network Authority, c2011.
7. Ministry of Land, Transportation and Maritime Affairs, Korea Building Code, Architectural Institute of Korea, c2009.
8. Ministry of Construction and Transportation, Korea Tunnel Design Code, Korean Tunnelling Association, c2007.
9. Ministry of Land, Transportation and Maritime Affairs, Korea River Design Criteria, Korea Water Resources Association, c2009.
10. Ministry of Maritime Affairs and Fisheries, Korea Harbor and Fishery Design Criteria, Korea Port and Harbours Association, c2005.
11. Korea Ministry of Construction and Transportation, Korea Airport Facilities Seismic Design Criteria, c2004.
12. Ministry of Land, Transportation and Maritime Affairs, Korea Urban Railroad Seismic Design Criteria, c2010.
13. Ministry of Land, Transportation and Maritime Affairs, Korea

- Common Duct Design Criteria, Korea Infrastructure Safety and Technology Corporation, c2010.
14. Ministry of Land, Transportation and Maritime Affairs, Equipment Criteria about Construction of Tramway Facilities, c2010.
15. Ministry of Land, Transportation and Maritime Affairs, A Study on the Improvement of Earthquake Preparedness System for Infrastructures of Land, Transport and Maritime, Korea Infrastructure Safety and Technology Corporation, c2012.
16. National Emergency Management Agency, Development of National Seismic Performance Criteria, NEMA-07-NH-03, Seoul National University R&DB Foundation, c2009.
17. Wald DJ, Quitoriano V, Heaton TH, Kanamori H. Relationships between Peak Ground Acceleration, Peak Ground Velocity, and Modified Mercalli Intensity in California, *Earthquake Spectra*, 1999; 15(3): 557-564.
18. Gutenberg B, Richter CF. Earthquake Magnitude, Intensity, Energy and Acceleration (2nd paper), *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1956; 46(2): 105-145.
19. Trifunac MD, Brady AG. On the Correlation of Seismic Intensity Scales with the Peaks of Recorded Ground Motion, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1975; 65: 139-162.
20. Korea Meteorological Administration, A Study on the Optimization of Acceleration Observation Network Configuration and Gauge Intensity Map, *Earthquake Engineering Society of Korea*, c2006, p.48-69.
21. Wikipedia, the free encyclopedia, Available from: [http://en.wikipedia.org/wiki/Modified\\_Mercalli\\_intensity](http://en.wikipedia.org/wiki/Modified_Mercalli_intensity)
22. International Organization for Standardization, ISO 3010: Basis for Design of Structures, c2001.
23. British Standard, Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance – Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings, BS EN1998-1, c2004.
24. British Standard, Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance – Part 2: Bridges, BS EN1998-2, c2005.
25. Federal Emergency Management Agency, FEMA-445, Next-Generation Performance-Based Seismic Design Guideline: Program Plan for New and Existing Buildings, Applied Technology Council, c2005.
26. National Emergency Management Agency, Publication of National Seismic Hazard Maps, NEMA Notification 2013-179, c2013.
27. Ministry of Land, Transportation and Maritime Affairs, Seismic Assessment and Retrofitting Guidelines for Bridges, 11-B552016-000009-01, Korea Infrastructure Safety & Technology Corporation, c2011.
28. International Code Council, IBC: International Building Code, c2009.
29. American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, ISBN: 978-1-56051-523-4, c2012.
30. Ministry of Land, Transportation and Maritime Affairs, Structure Foundation Design Code, Korea Geotechnical Society, c2008.