

지진 하중 저감기술을 활용한 내진성능향상 공법: GB-SLAB

Seismic Performance Improvement Using the Reduction of Earthquake Load : GB-SLAB



이승창*
Seung-Chang Lee



최창식**
Chang-Sik Choi



오정근***
Jung-Keun Oh



황대진****
Dae-Jin Hwang



김경환*****
Keung-Hwan Kim

1. 서론

최근 일본 동북부 대지진 이후 지진에 대한 관심이 증대되고 있다. 대지진 이후, 구조 연구자나 기술자는 다음과 같이 주요 세가지 질문을 많이 받는다.

- ① 국내 건축물은 지진에 대하여 안전한가?
- ② 어느 정도 지진까지 견딜 수 있을까?
- ③ 지진에 대한 대책은 무엇인가?

이러한 질문에 대한 대답은 주로 ‘내진설계가 도입된 1988년 이후 건설된 구조물은 안전하다’, ‘내진 설계된 구조물은 리히터 규모(M) 약 5.5 정도까지는 견딜 수 있다’, ‘지진에 저항할 수 있는 방법에는 내진, 제진, 면진 등이 있으며 경제성을 고려하여 선택할 수 있다’ 등이 일반적인 대답일 수 있다. 물론 이러한 대답에 많은 허점이 있음을 동감하며 본 기사를 쓰고자 한다.

현재 시점에서 일반화된 이러한 질문과 대답에서 간과하고 있는 사실이 있다. 현행 내진 관련 기술(제진 및 면진 포함)은 지진이라는 원인 보다는 지진에 대한 구조물의 반응(response)에 중심을 두고 있다는 것이다. 즉, 모든 문제에는 원인이 있고 이러한 원인을 분석하면 해답을 찾을 수 있다. 그러므로 우리는 지진에 대해서 좀 더 알아볼 필요가 있으며, ‘이러한 문제의 원인인 지진하중을 줄일 수 있는 방법은 없을까?’라는 가장 기본적인 중요하고 질문을 던지게 된다.

따라서 본 기사에서는 첫 부분에서는 지진에 대한 기본적인 이해를 돕기 위해서 인공지진과 응답스펙트럼에 대해서 서술하고¹⁾, 두 번째 부분에서는 지진 하중 저감 기술을 소개하고, 세 번째 부분에서는 지진하중 저감 기술을 활용한 내진성능 향상 공법에 대하여 서술하고자 한다.

* 정희원, 삼성건설 기반기술연구소 수석연구원
sc88.lee@samsung.com

** 정희원, 한양대학교 건축공학부 교수

*** 정희원, 삼성건설 기반기술연구소 수석연구원

**** 삼성건설 기반기술연구소 상무

***** 정희원, 삼성건설 기술연구센터 전무

2. 인공지진과 응답스펙트럼

비선형 동적 거동을 나타내는 구조물의 해석에서 무엇보다 중요한 일은 구조물의 반응을 좌우하는 하중 형태를 결정하는 것이다. 특히, 비대칭 구조나 질량 및 강성 분포가 불규칙한 비정형 구조물의 경우, 동적 해석에 의한 내진 설계시 지진하중의 형태는 설계 결과에 많은 영향을 준다. 이러한 동적 해석법으로는 비교적 간단하게 구조물의 동적 특성을 고려할 수 있는 지진 기록을 스펙트럼으로 정의하여 근사 해석을 수행하는 응답 스펙트럼 해석법과 상당한 시간이 요구되기는 하나 정밀한 동적 해석 결과를 얻기 위해 지진 가속도 기록을 직접 적분하여 사용하는 시간 이력 해석법이 있다. 이 두 가지 방법에 의한 해석 결과가 신뢰성을 가지기 위해서는 적절한 지진 기록과 이에 따른 응답 스펙트럼 또는 설계 응답 스펙트럼이 요구된다.

그러나 국내에서 기록된 지진의 수는 부족할 뿐만 아니라 기록된 데이터의 수집과 정리가 미흡하므로 국내 특성에 부합되며 기준이 될 만한 지진 기록과 응답 스펙트럼의 제시가 어려운 실정이다. 그러므로 우리나라와 같이 지진 기록이 부족한 경우 실제로 발생한 지진 기록에 의존하기 보다는 지진의 여러 가지 동적 특성과 지진 기록이 많은 다른 유사한 지역의 기본적인 정보를 바탕으로 확률론적 지반 운동 모델(stochastic ground motion model)을 개발하여 다양한 인공 지진파를 발생하고, 이들에 대한 통계 처리를 기반으로 설계 응답 스펙트럼을 제시하여야 한다.

2.1 인공지진 생성 과정

본 고의 제 1저자의 연구¹⁾에서는 기존 연구로부터 <그림 1>과 같이 인공 지진 생성과 관련 과정을 크게 다섯 부분으로 분류하여 정의하였다. Trifunac²⁾은 지진 자체의 특성인 규모(M)와 지역적인 특성인 지반조건(SC), 진앙깊이(H), 진앙거리(R)를 기본 정보로 하여, 유효 지반 운동 시간(significant

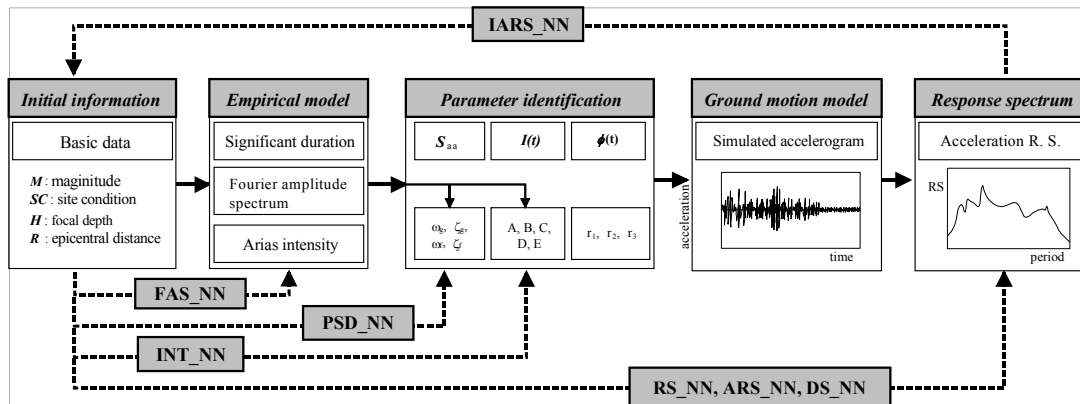


그림 1. 인공지진 및 응답스펙트럼 생성과정

duration, t_p)과 푸리에 진폭 스펙트럼(fourier amplitude spectrum, FAS)을 생성하는 경험적인 모델을 제안하였다.

Yeh³⁾는 지진의 부정형(nonstationary) 특성을 고려하기 위해서, 실제 지진 기록을 기반으로 지반 운동 모델을 강도함수(intensity function, INT) $I(t)$, 파워 스펙트럼 밀도함수(power spectral density function, PSD) S_{aa} , 주기 변조 함수(frequency modulation function) $\phi(t)$ 의 3개의 함수로 구성하고, 식(1)과 같은 형태로 인공 지진과 $a(t)$ 를 발생하였다.

$$a(t) = I(t) \zeta(\phi(t)) = I(t)\zeta(t) \quad (1)$$

여기서, $\zeta(\phi(t))$ 는 $\phi(t)$ 에 대한 여과된 백색파(filtered white noise)

또한 Eliopoulos⁴⁾는 지진의 형태를 특징적(characteristic) 지진과 비특징적(non-characteristic) 지진으로 분류하고, Trifunac의 경험 모델을 이용하여 3개 함수의 변수를 추정하였다. 즉, 푸리에 진폭 스펙트럼과 이로부터 구한 arias intensity를 기반으로 강도함수와 파워 스펙트럼 밀도함수의 변수를 추정하였고, 주기 변조 함수의 변수는 지역적인 특성을 나타내므로 해당 지역에서 기록된 평균값과 총 지반운동 시간(t_p)으로부터 추정하였다. 생성한 인공 지진과 $a(t)$ 는 newmark방법에 의해 응답 스펙트럼을 구하는데 사용되고, 이것은 궁극적으로 설계 응답 스펙트럼을 구하는데 이용된다.

2.2 지진의 불확실성과 설계 스펙트럼

지진은 지진규모, 진앙거리 및 지질학적 변수 등에 따라 불규칙하게 발생되어 불확실하고 불확정적인 특성을 내포하기 때문에 기존의 인공 지진과 발생에 관련된 연구에서 알 수 있듯이 지진과 생성에는 확률론적이거나 경험적인 과정을 포함하고 있

다. 이러한 불확실성을 내진 설계 기준에서는 2.1절에서 설명한 바와 같이 설계 응답 스펙트럼에 포함시키게 된다.

3. 지진하중 저감기술

3.1 지진과 지진하중

2절에서 설명한 바와 같이 지진(파)은 설계 응답 스펙트럼의 형태로 변환되어 동적 해석(응답스펙트럼해석)에 사용된다. 또한 등가 정적 해석에서는 이러한 지진이 지진응답계수(C_s)로 변화되고 건물 중량(W)에 곱해서 식(2)와 같이 지진하중 또는 지진력(밀면전단력, V)의 형태로 표현한다.

$$V = C_s \times W \quad (2)$$

여기서 C_s : 지진응답계수,
 W : 유효 건물 중량

제어가 매우 어려운 불확실성을 내포한 지진이 지진하중으로 표현될 때 건물 중량이라는 매우 중요한 매개체가 등장한다. 즉, 가벼운 건물일수록 지진하중이 줄어드는 뉴턴의 제2운동법칙($F = ma$)이 성립하게 된다.

3.2 지진 하중 저감 기술 및 적용 효과

3.1절에서 설명한 바와 같이 지진하중을 저감할 수 있는 효율적인 방법은 건물의 중량(질량)을 줄이는 것이다. 지진과 같은 수평하중에 저항하며 건물의 중량을 줄일 수 있는 방법은 슬래브의 중량을 감소시키는 방법이다. 1방향이 아닌 2방향 평면 형상이 나타나는 건축물에서는 '2 방향 중공 슬래브'를 적용하여 슬래브의 중량을 절감할 수 있다.

저자는 기존의 이방향 중공 슬래브의 단점을 극복하며 슬래브의 총 중량을 약 30% 절감할 수 있는 GB-SLAB(Green Ball based lightweight biaxial concrete SLAB)를 개발하였다. GB-SLAB 공법에 대해서는 다음 절에서 상세하게 설명하고, 본 절에서는 GB-SLAB의 지진하중 저감 효과에 대하여 설명하고자 한다.

3.2.1 해석 대상 구조물

GB-SLAB의 지진하중 저감 효과를 수치적으로 비교하기 위하여 <그림 2>와 같은 대상 구조물에 대하여 동적 해석을 실시하였다. 해석 구조물로는 국내에서 보편적으로 많이 적용되고 있는 판상형 아파트 구조물로서 30평형 4세대를 기준 평면으로 하고, 지진하중이 지배설계하중으로 작용하는 20층과 30층의 2가지의 층수를 가지는 구조물을 대상으로 하였다.

3.2.2 해석 결과 비교 분석

지진하중을 대표할 수 있는 해석 값은 ‘밀면 전단력(seismic base shear)’이므로 정적 및 동적 해석 결과로부터 이를 산출하여 비교하였다. <표 1>은 20층 구조물에 대한 밀면 전단력 결과를 비교한 것이다. 본 구조물의 구조시스템은 철근콘크리트 보통 전단벽을 가지는 내력벽 시스템이므로 R(반응수정계수) 값을 4.0으로 선정하였다. R값 등 모든 조건이 동일한 상태에서 Solid Slab와 GB-SLAB가 각각 적용되었을 경우의 밀면 전단력을 비교하였다. GB-SLAB의 건물 중량 감소 효과에 의해 밀면 전단력은 동적 해석의 경우 약 7~9%, 정적 해석의 경우 약 10% 감소하였다. 지진하중의 크기가 20층 보다는 커질 것으로 예상되는 30층 구조물의 경우 <표 2>에서는 밀면 전단력의 감소율이 동적 해석의 경우가 약 11~12%, 정적 해석의 경우에는 약 13%로 감소율이 증가하였다.

<표 1>과 <표 2>에서 보는 바와 같이 R값을 기준으로 해석 결과를 재분석해 보면, R = 4.0을 가지는 GB-SLAB 적용

표 1. 20층 구조물의 밀면 전단력 비교(kN)

구분	R	응답스펙트럼 해석 등가정적해석			고유주기(sec)	
		RX	RY	V = Cs W	Tx	Ty
Solid 슬래브	4.0	4,025	5,362	8,676	2,599	1,458
	4.5	3,557	4,739	7,712	-	-
GB-슬래브	5.0	3,202	4,265	6,941	-	-
	4.0	3,678	4,963	7,782	2,456	1,379
감소량	4.0	-9%	-7%	-10%	-5.5%	-5.4%

표 2. 30층 구조물의 밀면 전단력 비교(kN)

구분	R	응답스펙트럼 해석 등가정적해석			고유주기(sec)	
		RX	RY	V = Cs W	Tx	Ty
Solid 슬래브	4.0	3,488	5,743	9,492	4.48	2.89
	4.5	3,557	5,104	8,437	-	-
GB-슬래브	5.0	3,202	4,594	7,593	-	-
	4.0	3,107	5,034	8,263	4.31	2.76
감소량	4.0	-11%	-12%	-13%	-3.8%	-4.5%

시의 밀면전단력이 R = 4.5를 가지는 Solid Slab와 유사한 값을 보인다. 따라서 GB-SLAB는 밀면전단력 감소 효과를 통하여 R값을 약 10% 증가시킨다.

3.2.3 GB-SLAB에 의한 지진하중 저감 효과

전술한 바와 같이 ‘밀면 전단력’으로 대표되는 지진하중의 크기를 비교한 결과 GB-SLAB를 적용할 경우 20~30층 구조물의 경우 약 10% 이상의 지진하중 저감 효과가 있는 것으로 판단된다. 또한 구조시스템의 내진 성능을 대표할 수 있는 R값을 약 10% 증가한 것으로 표현 가능하므로 GB-SLAB는 내진성능을 약 10% 증가시킨다고 할 수 있다.

4. 지진하중 저감기술을 활용한 내진 성능 향상 공법

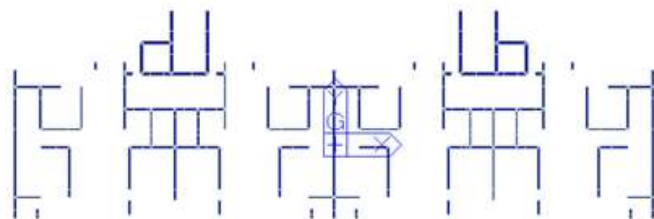
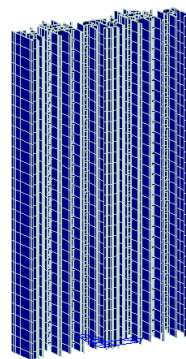


그림 2. 해석 대상 구조물(판상형 아파트 구조물, 30평형 4세대, 20/30 층)



4.1 이방향 중공 슬래브 공법

2000년대 중반 이후 장소 변화 및 주거환경에 대한 관심이 증대됨에 따라 슬래브 두께가 증가하고 있다. 슬래브 두께를 증가하는 방법은 매우 간단한 방법이지만 건물 전체의 중량을 무겁게 하여 지진하중을 증가시키고

이에 저항하기 위하여 기둥, 기초 등의 크기 및 수량 증가하는 등의 구조적인 문제점을 보인다. 또한 건물의 공사비용 증가에 따른 경제성 저하 및 내진 성능 저하라는 문제점이 나타나게 된다. 내진 설계의 기본 개념인 ‘Strong Column Weak Beam’을 만족하며 슬래브의 중량을 줄이기 위한 노력의 일환으로 ‘2방향 중공 슬래브’가 1990년대 초에 유럽 선진사(Bubbledeck, Cobiax)에서 개발되기 시작하였다. 중공체의 재료로 유럽에서는 플라스틱을 일본에서는 스티로폼을 사용하며 유사하지만 다른 형태로 발전되어 왔다. 국내에서는 2000년대 중반 이후 공동주택의 슬래브 두께가 200 mm를 초과하기 시작하며 관심의 대상이 되기 시작하여 여러 회사와 연구기관에 개발을 추진 중이나 선진사 공법의 범위를 크게 벗어나지 못하고 있는 실정이다.

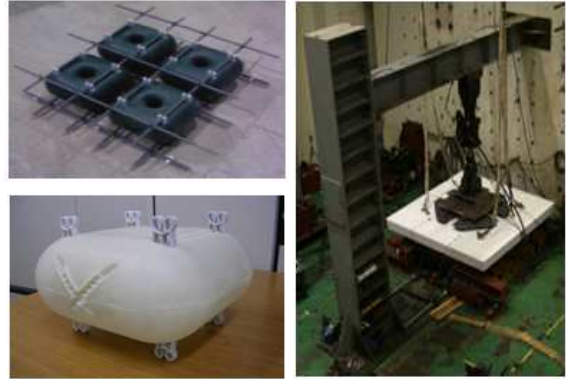


사진 1. 최적 GB형상 사진 2. 이방향 휨 실험체 설치 상황

4.2 세계 최고 성능 GB-SLAB 공법 개발

삼성물산(주) 건설부문과 한양대학교에서는 2007년부터 개발을 시작하여 2010년에 주택 현장에 일부 시험 적용을 완료하였다.

GB-SLAB 공법은 선진사 공법 대비 구조성능을 30% 향상시킨 세계 최고 수준의 슬래브 공법으로써 슬래브 상하부근 사이에 그린 볼이라고 하는 플라스틱 볼을 삽입하여 슬래브 콘크리트 중량을 약 30% 감소시키면서 단면 효율을 극대화하여 기존 솔리드 슬래브와 동등 이상의 휨 및 사용 성능을 발휘하는 최신 슬래브 최적화 공법이다. 본 공법은 특허 등록 2건, 출원 2건(해외 1건 포함)의 지적 재산권을 보유하고 있으며, 한국콘크리트학회와 지식경제부 기술표준원에서 공동 주최한 ‘2010년도 콘크리트 기술경연대회’에 참석하여 경쟁 심사를 통하여 신기술 분야 1등으로 ‘지식경제부 장관상’을 수상하였다.

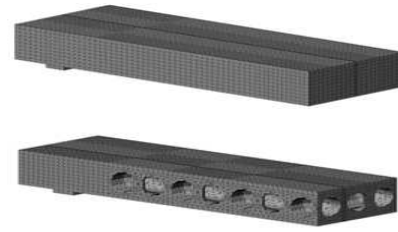


그림 3. 비선형 유한요소해석

법은 선진사 공법 대비 최대 28%의 극한하중 증가를 나타내고 있으며, 기존 공법인 솔리드(solid) 슬래브와 동등 이상의 구조 성능을 보여 주고 있다. 이 결과는 다른 이방향 중공 슬래브에서 나타날 수 없는 차별화된 결과로 기존 중공 슬래브의 약점인 단면감소에 따른 극한 성능 저하라 단점을 극복한 매우 의미 있는 결과이다.

5. GB-SLAB 공법의 성능

5.1 구조 성능

이방향 중공 슬래브의 구조성능은 중공체의 형상에 크게 좌우된다. 중공률을 크게 하는 형상을 사용할 경우 구조 성능은 저하되며, 중공률이 적을 경우 구조 성능은 향상 되나 내진 성능 또는 경제성이 저하된다. 연구개발 초기 단계에 <그림 3>과 같이 비선형 해석(LUSAS)을 수행하여 <사진 1>과 같은 도우넛형상의 최적 중공체를 도출하였다.

GB-SLAB의 구조성능을 확인하기 위하여 1/2방향 각각에 대하여 휨/전단 등 총 17개의 구조실험을 실시하였으며, <사진 2>에서는 한양대 구조실험실에서 수행한 이방향 슬래브 구조 실험체를 보여 주고 있다. 또한 <그림 4>의 하중-처짐 곡선은 1방향 휨 실험결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 GB-SLAB 공

5.2 경제성, 친환경, 사용성능

GB-SLAB의 경제성은 내진성능과 관련이 크다. 솔리드 슬래브로 설계된 구조물에 지진 하중 저감에 따른 물량 감소를 적용하지 않고 GB-SLAB를 적용한다면 본 기사의 3절에서 언

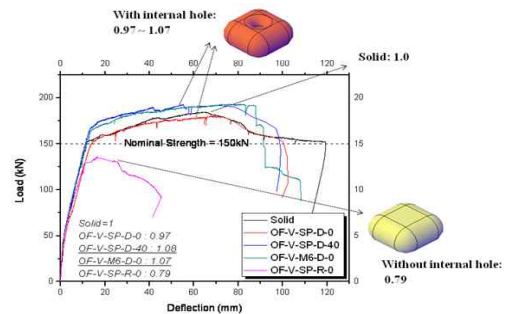


그림 4. 1방향 휨 실험 결과

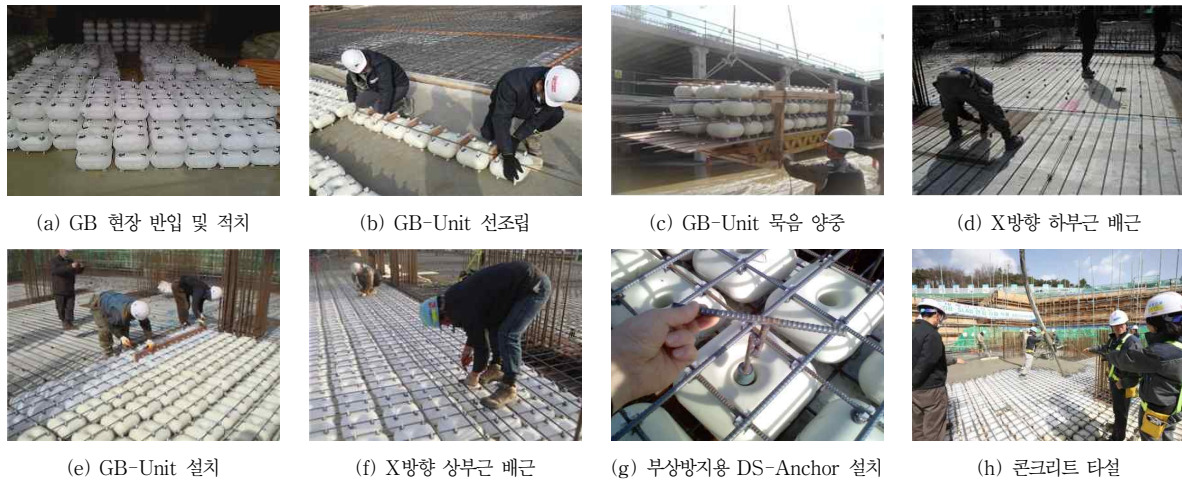


사진 3. GB-SLAB 시공과정

급한 바와 같이 내진성능을 약 10% 증가시킨다. 이 경우 GB-SLAB 시공에 따른 추가 시공 비용이 발생한다. 그러나 동일한 내진성능을 보유하고자 한다면 기둥 및 기초 물량 감소에 의해 솔리드 슬래브 대비 원가 절감을 할 수 있는 경제적인 공법이다. <그림 4>에서 설명한 바와 같이 이방향 중공 슬래브 중에서 GB-SLAB만이 솔리드 슬래브 대비 구조 성능을 감소하지 않고 경제성을 확보할 수 있다.

GB-SLAB 공법은 리사이클링(recycling)이 어려운 콘크리트 사용량을 감소하여 CO₂ 발생량을 감소시키는 친환경 공법이며, 기존 솔리드 슬래브 대비 고유진동수를 증가시켜 진동성능을 향상시키는 공법이다. 친환경 및 사용성능에 있어서도 GB-SLAB는 기존 이방향 중공 슬래브와는 차별화된 우수한 성능을 보인다.

5.3 시공성

GB-SLAB공법의 시공 단계는 <사진 3>과 같다. GB-Unit 선조립 및 배근 작업의 효율화를 통하여 적용 슬래브 상에서의 배근 작업을 최소화하였다. 현행 솔리드 공법 및 선진사 이방향 중공 슬래브 공법 대비 1~2단계의 배근 작업을 감소하여 전체 공기에 영향이 없는 공법을 개발하였다.

6. 결 론

본 기사에서는 지진하중을 저감할 수 있는 기술로 건물의 중량을 가볍게 할 수 있는 GB-SLAB신공법을 소개하였다. 건물의 중량을 가볍게 할 수 있는 기술은 재료 및 구조시스템 측면에서 다양하게 존재할 수 있다. 예를 들어 경량 콘크리트를 사용

하는 방법은 가장 고전적인 방법이나 구조 성능을 감소시키는 단점이 있어 구조체에 사용하기 어렵다. 따라서 지진하중을 줄이기 위한 노력으로 'Lighter but Stronger'를 화두로 하여 GB-SLAB와 같은 더 가벼우면서도 기존 시스템 보다 강한 구조의 지속적인 개발과 다양한 프로젝트 적용을 기대하여 본 고를 마치고자 한다. □

참고문헌

1. LEE S.C. and HAN S.W., "Neural-network-based models for generating artificial earthquakes and response spectra", Computers & Structures, Vol. 80, 2002, pp. 1627 ~ 1638.
2. Trifunac M.D. and Lee V.W., "Empirical models for scaling fourier amplitude spectra of strong ground acceleration in terms of earthquake magnitude, source to station distance, site intensity and recording site conditions", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 8(3), 1989, pp. 110 ~ 123.
3. Yeh C.H and Wen Y.K., "Modeling of nonstationary ground motion and analysis of inelastic structural response", Structural Safety, Vol. 8, 1990, pp. 281 ~ 298.
4. Eliopoulos D.F., Wen Y.K. and Jacobs J-P. "Method of Seismic reliability evaluation for moment resisting steel frames", Structural research series no 562, University of Illinois at Urbana-Champaign, 1991.

담당 편집위원 :
이승창(삼성건설) sc88.lee@samsung.com