

# ICT센터 사례 연구를 통한 EQS의 건축 구조물 면진에 의 적용 연구

## A Study on the Application of EQS bearings for the Seismic Isolation of Building Structures by ICT Case study

유성문<sup>1)\*</sup> · 이유인<sup>1)</sup> · 지용수<sup>1)</sup> · 최대성<sup>1)</sup> · 김두기<sup>2)</sup>

Yu, Seong-Mun<sup>1)\*</sup> · Lee, You-In<sup>1)</sup> · Ji, Yong-Soo<sup>1)</sup> · Choi, Dae-Sung<sup>1)</sup> · Kim, Doo-ki<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>에스코알티에스 기술연구소, <sup>2)</sup>군산대학교 토목공학과

<sup>1)</sup>ESCO RTS Co.,Ltd. R&D center, <sup>2)</sup>Kunsan National University, Department of Civil Engineering

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

An application of the EQS (Eradi Quake System) bearings to a short period building structure and the structure earthquake responses according to the design parameters of the EQS are studied by the ICT Center case study. The features of the EQS application to seismic isolated building structures are investigated, and the design procedure to determine the yield load and the secondary stiffness of the EQS is also studied. A computational analysis is performed to confirm the applicability of the EQS to the building structure and the earthquake responses according to the design parameters. The ICT Center in Indonesia is adopted as an application case of the EQS. The application of the EQS is found to extend the fundamental period of the ICT Center. Three types of EQS with different yield loads and secondary stiffness are designed and applied in the earthquake response analyses. The analysis results show the response of the structure with respect to the design parameters and which type of EQS is suitable for the ICT Center.

**Key words:** EQS, Building Structure, Design parameters, Yield Load, Secondary Stiffness, Earthquake Response Analysis, Case Study, ICT center

## 1. 서론

근래 들어 전 세계적으로 지각활동에 따른 지진 발생이 활발해 지는 추세이며, 쓰촨성 대지진이나 동일본 대지진, 인도네시아 수마트라 대지진과 같이 큰 인명 및 재산상 피해를 남기는 대지진의 발생 또한 증가하는 추세에 있다. 우리나라는 주변 국가에 비해 지진에 비교적 안전한 구역으로 인식되어 왔지만, 최근 들어 규모 3 이상의 지진 발생 횟수가 꾸준히 증가하는 추세를 볼 때 우리나라 또한 지진의 안전지대라고만 할 수 없다. 이러한 상황에도 우리나라의 구조물에 대한 지진 대비는 내진 선진국에 비해 상대적으로 부족한 편이다.

고유주기가 짧은 2~5층 건축 구조물은 고유주기가 긴 교량, 빌딩 등의 대형 구조물에 비해 고유주기가 짧은 지진에 더 취약하고 붕괴 가능성 또한 더 높은 것으로 알려져 있다. 실제로 2005년 개정된 건축법시행령 제 32조

(구조안전의 확인)에서는 3층 이상의 건축 구조물 및 연면적 1000제곱미터 이상의 건축 구조물 설계 시 지진 안전여부를 확인하게 되어 있다. 따라서 향후 시공될 일반 주거용 건축 구조물을 포함한 모든 건축물의 설계 시에는 지진 대비 설계 및 설비가 의무적으로 고려될 것이다.

지진 대비 설계에는 크게 내진 구조, 제진 및 면진 구조(지진 격리 구조라 고도 함)가 있다. 내진 구조는 구조물 자체가 지진력에 대응하는 구조이며 제진 및 면진 구조는 지진 에너지를 흡수하는 기기를 사용하거나 구조물과 지진을 격리시켜 구조물의 주기를 바꿈으로서 지진 가속도 및 변위로부터 구조물을 보호하는 구조이다. 아직 까지 국내에는 안전만을 생각하여 부재의 힘과 단단하고 두꺼운 구조를 이용한 내진구조가 주를 이루고 있다. 그러나 앞으로는 안전성과 더불어 안정성, 경제성, 심미성을 종합적으로 고려한 결과 면진 구조물의 적용이 늘어날 전망이다[2]. 내진 구조의 경우 지면과 구조물 전체가 강결되어 있으므로 지반의 진동 및 가속도가 전 층에 그대로 전달되며, 이는 건축 구조물 내부 구조물 및 배관 파괴, 균열 발생 등의 위험을 안고 있다. 또한 고층으로 갈수록 진동가속도 및 변위가 증폭될 수 있다. 그에 반해 제진 및 면진 구조는 구조물에 진동 및 가속도가 감소되어 전달되

\*Corresponding author: Yu, Seong-Mun

E-mail: smyu@enrtech.co.kr

(Received 4 September 2012; Accepted 4 February 2013)

며 전 층에 걸쳐 감쇠된 진동가속도 및 변위를 나타낸다. 또한 내진 구조에서는 구조물의 강성을 높이기 위해 구조물의 뼈대 및 지지가 거대해질 수 있는 반면에 제진 및 면진 구조에서는 그러한 보강이 필요 없으므로 경제성과 심미성을 동시에 만족시킬 수 있다[4].

면진 구조의 대표적인 방법 중 구조물의 하부와 지반 사이에 면진 성능을 지닌 면진 받침을 사용하는 방법이 있다. 면진 받침은 적절한 강성을 지님으로서 구조물의 주기를 구조물이 지진이 발생해도 안전하게 거동하도록 바뀌며, 감쇠성능을 통해 구조물에 전달되는 가속도와 변위를 감소시켜 준다. 이러한 면진 받침 중 EQS는 국내 교량용 면진 받침으로 가장 널리 쓰이는 제품으로 면진 성능과 내구성 및 지진 후 구조물을 원 위치로 복구시키는 복원 성능이 탁월한 것으로 알려져 있다. EQS는 폴리우레탄 스프링의 강성과 마찰재의 마찰뎀퍼 성능으로 구성된 받침으로 2000년대에 도입된 이후 거동 및 성능에 관한 국내 연구가 몇몇 진행된 바 있다[5]. 또한 EQS의 비선형 재료인 폴리우레탄과 마찰재의 동특성을 파악하여 받침의 거동 예측을 정밀화 하려는 연구도 진행되고 있는 중이다[1].

EQS는 도입 후 현재까지 주로 교량에 적용되어 교량에의 적용에 관한 연구는 진행된 바 있으나 건축 구조물에의 적용에 관한 연구는 상대적으로 부족하다. 몇몇 연구 및 사례를 통해 EQS의 건축 구조물에의 적용성을 확인 할 수 있다. Bang의 연구[6]에 따르면 EQS가 설치된 고속철도 역사에서의 진동 및 소음 측정 결과 EQS가 열차 통과 및 시제동 시 진동 및 소음 제어 효과가 있음을 보여주었다. 또한 이유인의 연구[3]에서 건축물에 EQS 적용 시의 지진 해석에 관한 기초적인 연구가 진행된 바 있다.

본 논문에서는 국내에서 교량 및 토목 구조물에 비해 면진 받침의 적용이 상대적으로 미비한 건축 구조물에의 면진 받침 적용 시 특징을 교량에 적용 시의 특징과 비교하였다. 그리고 EQS의 거동 및 특징이 건축물의 면진에 적합한 제품인지에 관한 내용도 기술하였다. 또한 EQS는 설계 시 PTFE의 접촉 압력 및 폴리우레탄 스프링 강성으로 설계 변수가 조절되는데 이 변수에 따른 구조물의 응답 변화에 관한 내용을 분석하였다. 분석된 내용과 EQS의 건축물 면진 성능을 확인하기 위해 실제 EQS가 적용된 건축 구조물을 대상으로 지진 응답 해석을 수행하였다.

## 2. EQS의 건축물 적용

### 2.1 건축 구조물의 면진 설계 적용 시 특징

#### 2.1.1 건축 구조물의 주기

교량 같은 경우 교각의 높이가 높고 단면적이 비교적 작아 장주기 구조물인 반면에 5층 미만의 저층 건축물의 경우 면적은 넓고 높이가 토목 구조물에 비해 낮은 편이라 단주기 구조물인 경우가 많다. 지진 발생 시 지진에너지의 대부분은 단주기 영역에 존재하며, 지진의 주기와 구조물의 주기가 비슷할 경우 지반의 지진 가속도 및 변위가 구조물로 전달되는 비율인 전달계수(transmissibility)가 커진다[7]. 즉, 고유주기가 작은 건축물은 지진 발생 시 지진에너지의 영향을 더 많이 받게 되고 구조물의 응답도 크다고 할 수 있어 지진 대비가 필수적이다. 이러한 건축물을 면진 시스템 없이 지반에 고정시켜 놓을 경우 진동으로 인한 균열, 구조물 손상, 붕괴의 위험이 더 높

아질 수 있다. 따라서 단주기 건축물의 경우 면진 시스템을 통해 구조물을 보호하는 것이 필요할 수 있다.

#### 2.1.2 건축 구조물의 면진 받침 설계 범위

건축 구조물은 건축물 면적, 사용용도, 내부 시설물 등 중요도에 따라 설계 계수가 다르게 적용된다. 따라서 건축물에 면진 받침을 적용할 경우 다양한 항복값과 2차 강성, 변위가 요구되며 그에 따른 설계가 필요하게 된다.

#### 2.1.3 상시 변위와 회전 변위

교량의 경우 경간의 길이가 폭에 비해 긴 형상을 가지고 있으며 수평부재의 단부에 받침이 위치하게 된다. 따라서 온도에 의해 발생하는 교축방향의 상시 변위가 큰 편이고, 교량의 시공 위치에 따라 풍하중과 차량하중에 의한 상시 변위도 자주 발생한다. 그에 반해 도심지에 위치한 일반 건축물의 경우 지진 발생을 제외하면 상시 변위 발생이 적은 편이다.

또한 교량의 상부구조는 단면적에 비해 길이가 긴 형상으로 인해 경간 중간부에 처짐이 발생한다. 이러한 처짐은 바닥판의 양 끝 쪽을 지지하고 있는 받침에 회전 변위를 발생시키며 교량에 적용되는 면진 받침은 이러한 회전 변위를 수용할 수 있게 설계된다. 반면에 건축 구조물의 경우 구조물의 바닥판 전체에 받침이 위치한다. 이러한 구조는 건축 구조물의 바닥판에 처짐이 거의 발생하지 않게 되고 따라서 처짐으로 인한 회전 변위도 받침에 거의 발생하지 않게 된다. 따라서 면진 받침이 건축 구조물에 적용될 시에는 회전 변위 수용이 불필요하다.

#### 2.1.4 변위 제어 및 복원 기능

교량의 경우 상부구조(super-structure)의 위치와 길이가 고정되어 있지 않다. 앞서 언급한 온도 하중, 풍하중, 진동하중 등에 의해서 상부구조의 위치나 길이가 변동되면 그러한 변위를 바닥판과 교각 사이에 있는 교좌장치가 수용한다. 교량의 상부구조에는 복잡한 부가 장치가 없으며 연결부에는 신축이음 장치가 설치되어 있어 변위가 발생한 상태로도 사용성에는 큰 이상이 없다. 교좌장치 중에는 상부구조물을 원위치로 복구시키는 복원 성능이 아예 없는 받침들도 있다. 그에 반해 건축물의 경우 구조물 자체가 교량에 비해 복잡한 형태를 지니며 가스, 전기, 배관 등의 부가 장치나 다른 구조물들과의 연결 등에 관련된 내용도 설계에 반영하여야 한다. 따라서 토목 구조물에 비해 더 세밀하고 정확한 변위제어가 필요하며 변위가 발생한 후에 구조물들을 원위치로 돌려놓는 복원 성능이 받침에 필수적으로 요구되게 된다.

#### 2.1.5 면진 받침의 배치

교량의 경우 면진 받침의 적용 시 상부구조의 양 끝 쪽 아래에 받침을 배치하는데 반해 건축물의 경우 구조물의 수직부재들 하단에 받침을 배치한다. 이렇게 수직 부재 하단에 받침 배치 시 받침이 여러 곳에 배치되게 되며, 받침들의 높이가 정확히 일치하지 않을 경우 일부 높이가 높은 받침들에 하

중이 집중되는 현상이 발생할 수 있다. 따라서 건축물에 면진 받침을 적용할 경우 제작 시 받침의 높이를 정확히 제작하거나 받침 자체에 완충을 위한 장치를 구성하여 모든 받침에 하중이 분포되도록 하여야 할 것이다. 또한 건축물은 별도의 공간을 만들지 않는 한 받침의 상시 모니터링 및 교체가 쉽지 않은 구조이다. 따라서 면진 받침의 내구성도 중요하게 평가되어야 할 것이다.

## 2.2 EQS의 구성 및 거동

### 2.2.1 EQS 구조

EQS 받침은 상부구조물의 바닥면과 하부구조 사이에 위치하며, 받침의 구조는 Fig. 1과 같다.

위판이 상부구조물의 바닥과 연결되고, 바닥판이 하부구조물에 고정된다. 주로 62D 폴리우레탄 재질이 사용되는 디스크패드 는 연직하중을 지지하고 연직 진동을 감쇠하는 역할을 하며 회전 변위의 수용도 가능하다. PTFE는 마찰력이 운동방향에 반대되는 방향성을 가진다는 원리를 이용하여 에너지 감쇠 기능을 가진다. 폴리우레탄 스프링은 2차 강성을 발현하며 수평 방향의 변위가 종료 된 후 내부 구조체와 PTFE를 원 위치로 복원시키는 복원력을 갖는다.

### 2.2.2 EQS 거동 이론

EQS의 거동은 연직하중에 마찰재의 마찰계수를 곱한 항과 측면 폴리우레탄 스프링의 강성과 변위의 곱으로 나타나는 항을 합하여 식 (1)과 같이

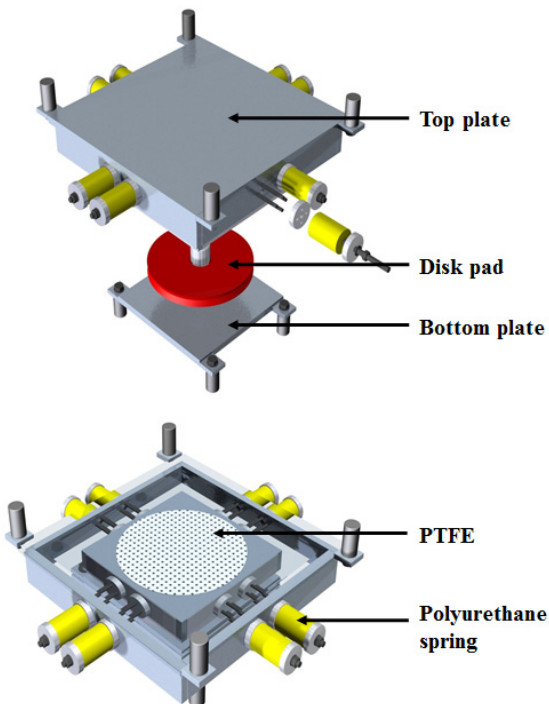


Fig. 1. Eradi Quake System(EQS)

표현된다.

$$P = k_2 \Delta h \pm N\mu \tag{1}$$

여기서,  $k_2$  : 측면 폴리우레탄 스프링의 강성

$\Delta h$  : 측면 폴리우레탄 스프링의 압축 변위

$N$  : 연직하중. 일반적으로 상부 구조물의 하중

$\mu$  : 마찰재의 마찰계수

식(1)에서 연직하중과 마찰재의 마찰계수의 곱에 ±부호가 붙는 것은 마찰력이 이동 방향의 반대 방향으로 작용하는 방향성을 나타낸 것이다. 이러한 EQS의 하중-변위 관계를 그림으로 나타내면 Fig. 2와 같다. Fig. 2에서 안쪽의 하중 변위 선도는 저속의 변위가 발생하였을 때의 이력곡선으로 마찰계수( $\mu_s$ )가 작은 값을 나타낸다. 바깥쪽의 이력곡선은 고속의 변위가 발생하여 마찰계수( $\mu_d$ )가 클 때의 이력곡선이다. 따라서 EQS는 지진과 같은 고속 변위 발생 시 바깥쪽의 이력곡선을 따라 큰 강성과 에너지 감쇠 성능을 발휘하여 구조물의 변위 및 진동을 제어하고, 고속 변위가 종료되면 마찰계수가 감소되어 폴리우레탄 스프링의 강성에 의해 안쪽의 이력곡선을 따라 복원을 하게 된다.

Fig. 3은 실제 EQS의 거동 시험 결과로 Fig. 2와 유사한 형태를 보인다.

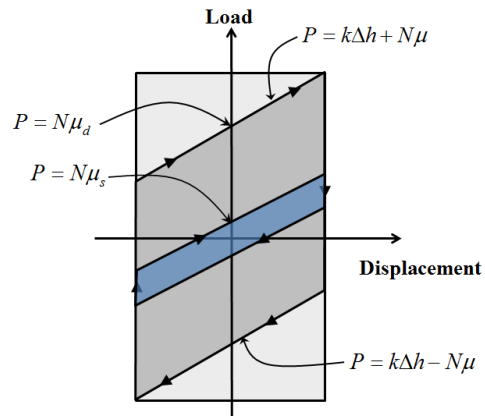


Fig. 2. Load-displacement curve of EQS

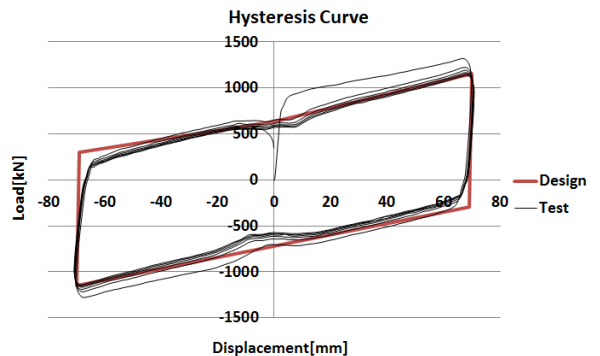


Fig. 3. Hysteresis curve(Design value and test result)

Fig. 2의 이력곡선은 마찰계수와 스프링의 강성이 상수라고 가정하여 작성한 것이다. 일반적으로 마찰재의 마찰계수는 압력 및 마찰속도에 따라 변하며, 스프링의 강성 또한 일정하지 않고, 변형률이나 압축 속도에 따라 변한다. 따라서 정확한 장치의 거동은 Fig. 3의 시험 결과와 같이 비선형성을 가지게 된다. EQS의 설계변수에 따른 거동 변화, 마찰계수의 면압과 속도와의 의존성, 폴리우레탄 스프링의 강성 변화 등에 관한 자세한 내용은 박형기 외(2011)와 정대유(2012) 등의 논문을 참조하도록 한다[1-5].

### 2.3 건축물의 면진을 위한 EQS의 적합성

앞에서 설명했던 면진 받침을 건축물에 적용할 때 필요한 기능 및 요구 조건들은 다음과 같다.

- 건축물을 장주기화 시켜 지진 발생 시 안전성 높일 것
- 다양한 설계 범위를 수용할 수 있을 것
- 변위 제어 기능과 복원 기능
- 높이 단차 조절 기능
- 내구성

EQS는 마찰을 통한 감쇠 기능은 마찰재와 철판 사이의 마찰력으로 설계하고, 2차 강성은 측면 폴리우레탄 스프링의 강성을 통하여 설계한다. EQS를 교량에 적용 시에는 보통 마찰계수를 0.07에 맞춘다. 그에 반해 건축물 적용 시에는 복원 기능이 중요 시 되므로 0.01~0.03 정도의 마찰계수를 사용한다. 또한 교량 적용 시에는 EQS의 2차 강성은 주로 항복값의 1%로 계산하여 적용되고 있으나 건축물의 경우 다양한 설계가 적용될 수 있다. 또한 마찰계수와 2차 강성 두 기능을 따로 설계하기 때문에 받침의 유효강성 또한 조절이 가능하게 된다. EQS의 유효강성은 Fig. 2의 이력곡선에서 최대변위의 점과 최소변위의 점을 연결한 직선의 기울기로 계산된다. 유효강성의 조절을 통해 건축물의 등가주기를 조절할 수 있을 뿐 아니라 다양한 설계 범위를 수용할 수 있다. 여기서 받침의 유효강성 또한 스프링의 길이 조절을 통한 변위의 설계 범위도 비교적 자유로운 편이다. 다른 면진 장치와 EQS의 가장 큰 차이점은 강성과 복원 기능을 지니는 폴리우레탄 스프링을 사용한다는 점이다. 폴리우레탄 스프링은 길이의 80% 이상 압축이 가능하며 변위 종료 후 거의 100% 가깝게 복원된다는 특징을 지니고 있다. 즉, 폴리우레탄은 EQS에 우수한 복원 성능을 제공한다. 또한 Fig. 1에서 설명하였던 디스크패드는 폴리우레탄 재질로서 재료 자체에 약간의 점성 댐퍼 기능을 가지고 있어 연직 진동을 일부 감쇠시켜줄 뿐 아니라 앞 절에서 설명하였던 받침 단차 조절 기능을 수행하여 건축물에 적용 시 제작 오차에 따른 받침의 높이 차이를 조절하여 모든 받침에 하중이 가해지도록 조절한다. 또한 고무 계열의 재료에 비해 높은 내구성을 지니고 있는 합성수지 재질의 마찰재와 폴리우레탄 재질의 스프링은 건축물의 국내 수명 기준 이상의 내구성을 갖는 것으로 알려져 있다[5].

## 3. EQS의 설계 변수에 따른 구조물의 응답

### 3.1 EQS의 설계 변수

EQS의 설계는 마찰재의 면적과 측면 폴리우레탄 스프링의 형상을 통해

이뤄진다. 마찰재의 면적은 받침의 항복하중을 조절하고, 스프링의 형상은 받침의 2차 강성을 조절한다.

항복하중은 마찰계수  $\mu$ 와 연직하중  $N$ 의 곱으로 식 (2)와 같이 표현된다.

$$P_y = N\mu \tag{2}$$

연직하중은 상부구조물의 무게로 받침 설계 시 조절할 수 있는 항이 아니다. 따라서 항복하중은 마찰계수를 조정함으로써 조절된다. EQS에 마찰재로 사용되는 PTFE는 접촉응력과 마찰속도에 따라 마찰계수가 변하는 성질을 가지고 있다. 지진 발생 시 마찰속도는 정확한 예측이 불가능 하며 실무에서는 100mm/sec의 속도로 가정하여 설계를 하고 있다. 결국 EQS의 항복강도 조절은 PTFE의 접촉응력을 통하여 조절하게 된다. PTFE의 마찰계수는 접촉응력이 증가함에 따라 Fig. 4와 같은 로그함수 형태로 감소하는 양상을 보이는 것으로 알려져 있으며 이를 식으로 나타내면 식 (3)과 같이 표현된다[1].

$$\mu(v) = \alpha + \beta \ln(v) \tag{3}$$

여기서  $\mu(v)$ 는 속도에 따른 마찰계수이고,  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 면압별 마찰계수 시험을 통해 계산되는 상수이다. 상수 및 면압과 속도에 따른 마찰계수의 정량적 내용은 정대유(2012) 논문을 참조하도록 한다[5]. 실제 EQS는 PTFE의 면압을 15~20MPa에 맞추어 설계를 한다. 이 경우 고속 변위 발생 시(기준 속도 100mm/sec) 마찰계수는 약 0.07 정도의 값을 가지며 저속 변위 발생 시(기준 속도 1mm/sec) 마찰계수는 약 0.02~0.03 정도의 값을 가진다.

따라서 같은 설계 하중에서 큰 항복하중이 필요할 경우 마찰재의 면적을 크게 설계하여 마찰계수를 높이고, 작은 항복강도가 필요한 경우에는 마찰재의 면적을 작게 설계한다.

2차 강성은 측면 스프링 한 개의 강성  $k_s$ 에 측면 당 스프링의 개수  $N_s$ 의 곱으로 식 (4)와 같이 표현된다.

$$k_2 = N_s k_s \tag{4}$$

여기서 측면 스프링의 압축 강성은 식 (5)와 같다.

$$k_s = \frac{E(1+S_f^2)A}{L} \tag{5}$$

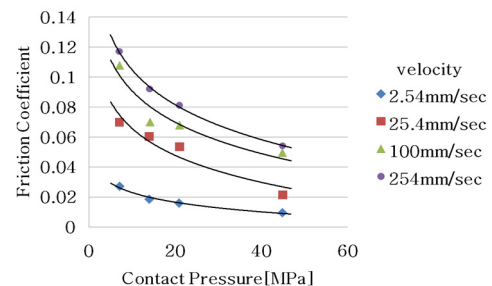


Fig. 4. Friction coefficient among contact pressures

여기서,  $k_s$  : 측면 폴리우레탄 스프링의 강성

$E_c$  : 폴리우레탄의 압축 탄성계수

$S_f$  : 측면 폴리우레탄 스프링의 형상 계수

$A$  : 폴리우레탄 스프링의 단면적

$L$  : 폴리우레탄 스프링의 길이

설계 시 지진 변위에 적합한 스프링의 길이를 지정한 후 스프링의 형상과 단면적을 조절하여 2차 강성을 조절한다.

### 3.2 EQS의 설계 변수에 따른 구조물의 응답

Fig. 2, Fig. 3에 도시된 EQS의 거동을 보면 수평하중이 항복강도에 다다르기 전에는 변위가 발생하지 않는다. 즉, 변위가 발생하기 전까지는 구조물이 강성이 매우 큰 고정지지 되어 있는 상태로 볼 수 있다. 결과적으로 항복강도가 크게 설계된 EQS가 적용된 구조물에 규모가 작은 지진이 발생할 경우 면진 성능의 발휘가 어려워져 지진 에너지의 감쇠가 원활하지 못할 수 있다는 것이다. 이 경우 어느 정도 규모 이상의 지진 발생 시에 면진 성능을 발휘할 수 있게 된다. 또한 항복강도가 크면 작은 수평 하중에서는 받침에서 변위가 발생하지 않으므로 지진 발생 시 변위가 감소하게 된다. 반대로 항복강도를 작게 설계한 경우 작은 규모의 지진에서도 면진 성능이 발휘되지만, 예상보다 큰 규모의 지진에서는 변위 발생이 증폭되어 구조물이나 받침이 허용할 수 있는 변위 이상의 변위가 발생할 수 있다.

따라서 EQS 설계 시 목표 지진의 규모에 따라 항복 강도를 조절하여야 한다. 예를 들면 작은 규모의 지진이 발생하는 지역의 경우 항복 강도를 작게 설계하여 적용하여 면진 성능을 발휘하도록 하여 응답 가속도와 하중을 감쇠시키는 동시에 지진 시뮬레이션을 통해 변위가 허용치를 넘지 않도록 설계하도록 한다. 반대로 큰 규모의 지진이 발생하는 경우에는 항복강도를 크게 설계하여 작은 규모의 지진 시에는 감쇠 능력이 부족하므로 구조물 자체의 강성으로 지진을 견디도록 하고, 큰 규모의 지진 발생 시에는 면진 성능을 발휘하도록 하는 방법이 사용될 수 있다.

항복 하중이 동일할 때 EQS 2차 강성의 증가는 같은 변위에서 받침의 유효강성을 증가시킨다. 2차 강성과 유효 강성의 의미는 Fig. 8에 도시되어 있다. 유효강성의 증가는 구조체의 고유주기를 감소시키게 된다. 즉, 항복 하중이 같을 시 2차 강성을 크게 설계 하면 구조물의 응답 가속도가 크게 나타나는 반면 변위는 감소하게 된다. 반대로 2차 강성을 작게 설계할 경우 구조물의 응답 가속도는 작게 나타나고 변위는 증가한다. 따라서 2차 강성 설계 시에는 응답 가속도를 일정 목표 이하로 감소시켜 구조물을 보호하면서도 설계 치 이상의 과도한 변위가 발생하지 않도록 2차 강성을 조절하는 설계가 필요하다.

## 4. EQS의 건축물 면진 적용 사례: ICT 센터

본 장에서는 2장에서 언급하였던 EQS의 건축물 적용 시 면진 효과와 3장에서 기술하였던 EQS의 설계 변수에 따른 구조물의 거동 양상 변화를 확인하기 위하여 실제 EQS가 적용된 건축 구조물을 대상으로 상용해석프로그램인 SAP 2000을 이용한 지진해석을 수행하였다.

### 4.1 대상 건축물 개요

본 논문에서 사례 분석으로 제시할 건축물은 인도네시아의 수마트라 섬 북서쪽 끝 Banda Aceh주에 위치한 Syiah Kuala University의 ICT 센터이다. 센터는 가로 36 m, 폭 24 m의 3층 건물로 2010년 12월에 완공되었으며 시공 시 175 ton 규모의 EQS가 37개 적용되었다.

### 4.2 구조물 모델링 및 해석 조건 입력

지진응답해석을 수행하기 위하여 전체 건축 구조물을 Fig. 6과 같이 모델링 하였다. 또한 면진 효과를 알아보기 위해 가속도와 변위를 추출할 절점도 높이별로 4곳 지정하였다. 절점 35, 1, 896, 730은 각각 지면, 받침 바로 위 1층 절점, 2층의 절점, 3층의 절점을 의미한다. 면진 장치는 Fig. 7에 나타난 도면과 동일하게 배치하여 해석을 진행하였다.

받침을 배치한 후에는 받침의 물성을 입력한다. 프로그램 내에서는 면진 받침을 입력할 시 받침 성능 변수로 K1, K2, Keff, Fy, Dmax를 입력하도록 되어있다. 여기서 K1은 일차강성, K2는 이차강성, Keff는 유효강성, Fy는 항복강도를 의미한다. 각 변수의 의미는 Fig. 8에 도시하였다.

EQS의 설계 변수에 따른 구조물 거동의 차이를 확인하기 위해 세 가지 타입의 EQS를 각각 적용하여 해석을 수행하였다. 각 EQS에서 입력한 받침 성능 변수는 Table 1과 같다.



Fig. 5. Indonesia ICT center

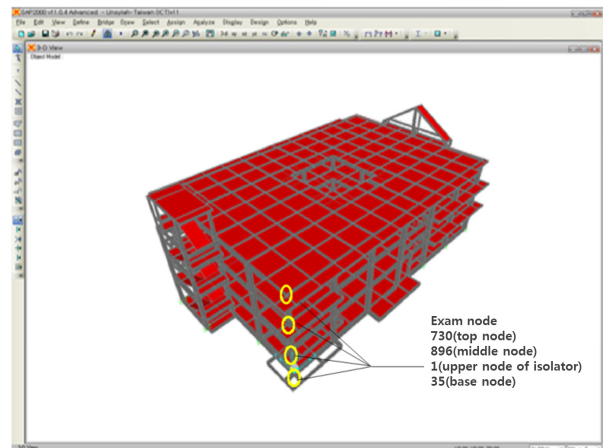


Fig. 6. Modeling of ICT center

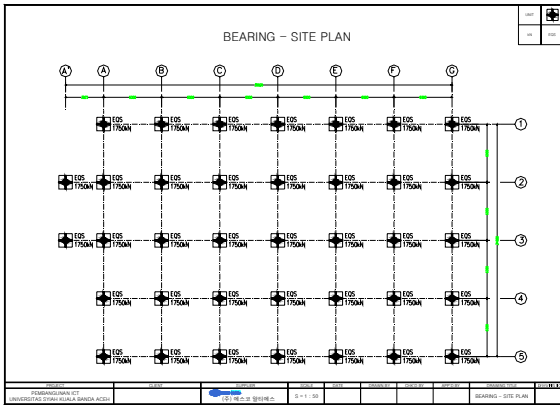


Fig. 7. Bearing of ICT center

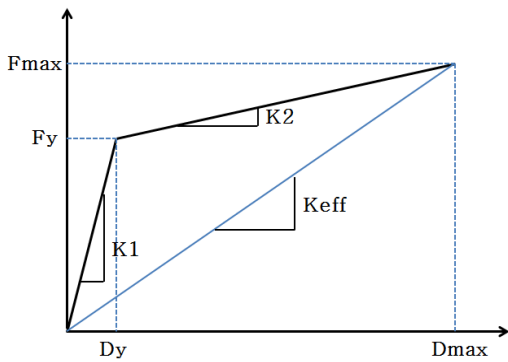


Fig. 8. Analysis parameters of EQS

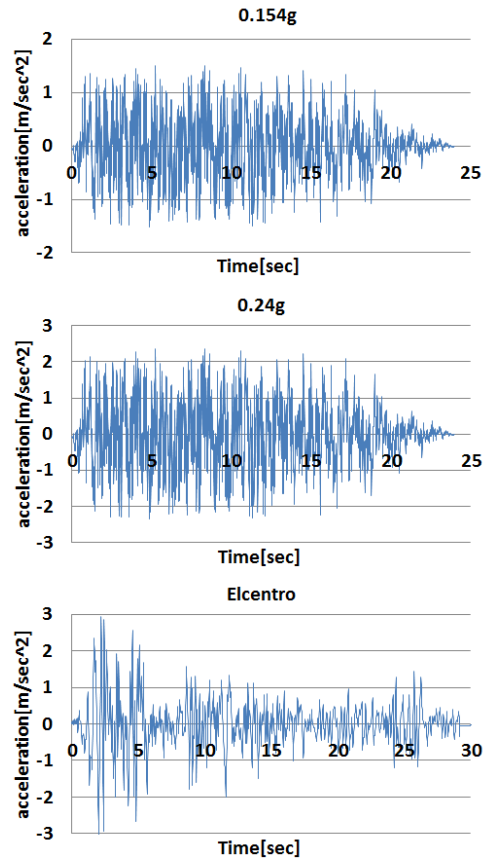


Fig. 9. Input earthquake motions

Table 1. Performance variables of EQS

	A type	B type	C type
K1[kN/mm]	25.195	37.796	50.396
K2[kN/mm]	0.748	0.669	0.591
Keff[kN/mm]	881.36	900.15	990.56
Fy[kN]	20	30	40
Dmax[mm]	150	130	100

Table 2. Frequency of fix system and seismic isolation system

Mode	Fix system	Isolation system (A type)	Isolation system (B type)	Isolation system (C type)
1	0.97sec	2.80sec	2.78sec	2.66sec
2	0.89sec	2.79sec	2.76sec	2.64sec

세 EQS는 거의 동일한 유효 강성을 갖는 제품으로서 A 타입은 항복하중이 작고 2차 강성이 큰 제품이고, C 타입은 항복하중이 크고 2차 강성이 작은 제품이며, B 타입은 중간 정도의 항복하중과 2차 강성을 갖는 제품이다.

구조물과 면진 받침을 모델링 한 후에는 구조물의 지진 응답에 사용할 지진파를 선정하였다. 구조물의 지진 응답 해석에는 총 세 가지의 지진파를 사용하였다. 지진파로는 우선 국내 교량 면진 설계 시 해석 수행 기준인 최대 가속도 0.154 g 인 인공지진파와 건물 설계 및 시공업체에서 지정해 준 최대 가속도 0.24 g 인 인공지진파 그리고 인공지진파와의 비교를 위해 익히 알려진 강진 중 하나로 지진 해석 시 자주 사용되는 Elcentro 지진의 NS 방향 지진파를 사용하였다. 인공지진파는 SIMKE 프로그램을 사용하여 작성하였다. 이와 같은 세 가지 종류의 입력 지진파를 Fig. 9에 도시하였다.

### 4.3 해석 결과 및 분석

#### 4.3.1 모드 해석 및 구조물 주기 변화

EQS의 건축물 면진 성능을 확인하기 위하여 면진 시스템을 적용하지 않고 구조물을 바닥에 고정점으로 연결한 고정 시스템과 EQS로 구조물을 면진한 면진 시스템을 각각 해석하여 비교하였다. 표 2는 두 시스템의 모드별 형상을 나타낸 것이다. Table 2의 주기는 건물의 사하중과 EQS의 등가 강성(고정 시스템의 경우 수직 부재의 강성) 및 감쇠를 적용하여 해석 프로그램을 통해 계산되었다. 여기서 EQS의 등가 강성은 표 1의 타입 별 설계변위(Dmax)에서의 등가 강성을 계산하여 해석을 진행하였다. 고정 시스템과 면진 시스템 모두 2모드 이내에서 수평 방향 및 회전 방향 질량 참여율의 합이 0.9 이상으로 해석되었다. 모드 해석 결과 고정 시스템의 경우 주기가 1초 이내인 단주기 거동을 하는데 비해 면진 시스템은 주기가 2.6~2.8초 내외인 장주기 거동을 하는 것을 알 수 있다. 이는 EQS의 적용으로 인한 면진

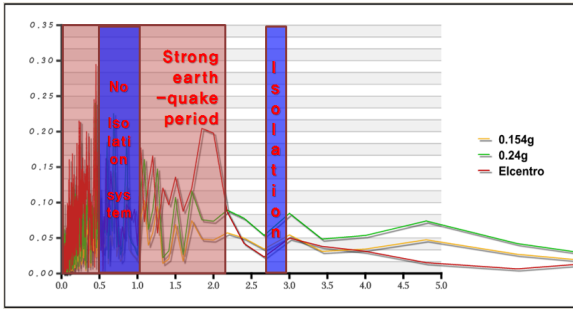


Fig. 10. Period of non isolated system and isolated system

효과로 대상 구조물이 장주기화된 것이다. 즉, 구조물이 더 안정적인 거동을 할 수 있게 해준다는 의미이다.

Fig. 10에 이와 같은 결과를 정리하였다. 세 가지 입력 지진의 파형을 주기에 따라 분석한 결과 세 지진 모두 강진이 주기 0~2초에 존재하였다. 면진 시스템 미적용 시에는 구조물의 주기가 강진 주기와 일치하여 구조물의 응답이 증폭되는 공진 현상이 발생할 수 있으나 면진 시스템 적용 시에는 구조물의 주기가 강진주기와 떨어져 안정성이 높아진다.

### 4.3.2 EQS 타입별 변위 및 구조물의 가속도 응답

세 가지 타입의 EQS를 적용시킨 구조물 각각에 3가지 지진파를 적용시켰을 경우의 응답 가속도를 해석을 통해 구하고 거동 시 EQS의 이력곡선을

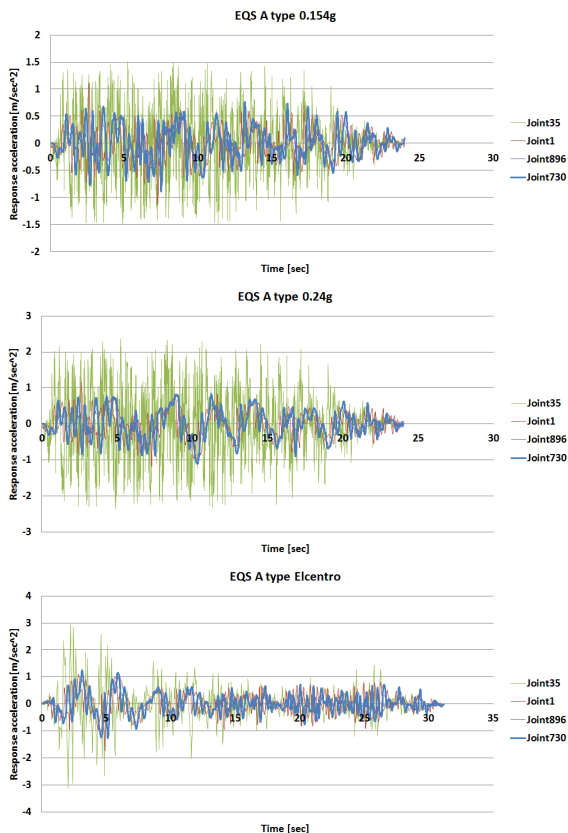


Fig. 11. Input earthquake motions and response of A type

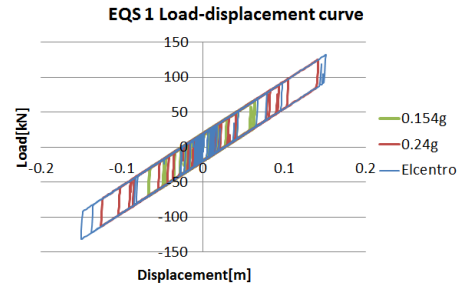


Fig. 12. A type EQS hysteresis curve

Table 3. Analysis results of A type EQS

Input motions	Node No. (floor)	Max response[m/sec <sup>2</sup> ]			Max disp [mm]	Max force [kN]
		Fix	EQS	decrease		
0.154g	35(ground)	1.51		-	64	67
	1(1st)	1.51	1.11	27%		
	896(2nd)	2.27	0.58	74%		
	730(3rd)	2.48	0.76	69%		
0.24g	35(ground)	2.35		-	140	126
	1(1st)	2.35	1.15	63%		
	896(2nd)	3.54	0.78	78%		
	730(3rd)	3.86	0.82	79%		
Elcentro	35(ground)	2.93		-	151	133
	1(1st)	2.93	1.09	63%		
	896(2nd)	4.51	0.99	78%		
	730(3rd)	6.15	1.26	80%		

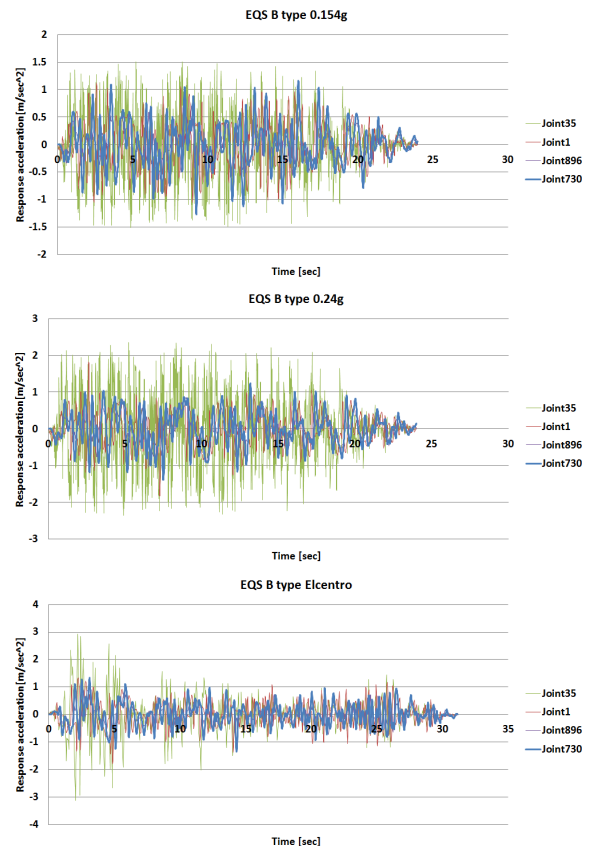


Fig. 13. Input earthquake motions and response of B type

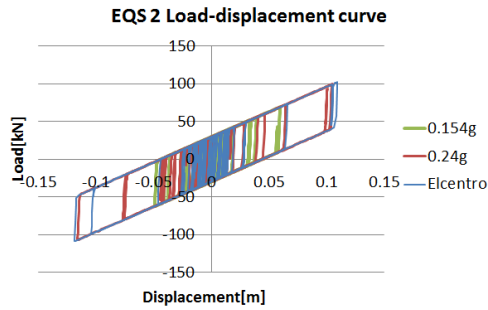


Fig. 14. A type EQS hysteresis curve

Table 4. Analysis results of A type EQS

Input motions	Node No. (floor)	Max response[m/sec <sup>2</sup> ]			Max disp [mm]	Max force [kN]
		Fix	EQS	decrease		
0.154g	35(ground)	1.51		-	60	69
	1(1st)	1.51	1.12	26%		
	896(2nd)	2.27	0.72	68%		
	730(3rd)	2.48	1.16	53%		
0.24g	35(ground)	2.35		-	106	100
	1(1st)	2.35	1.13	52%		
	896(2nd)	3.54	0.89	75%		
	730(3rd)	3.86	1.69	56%		
Elcentro	35(ground)	2.93		-	109	103
	1(1st)	2.93	1.35	54%		
	896(2nd)	4.51	0.92	80%		
	730(3rd)	6.15	1.33	78%		

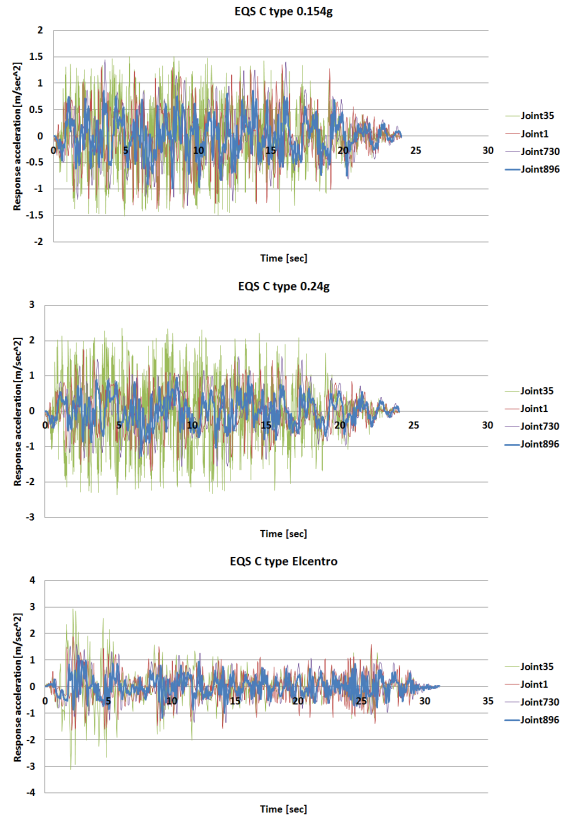


Fig. 15. Input earthquake motions and response of A type

도시하였다. 또한 구조물을 바닥에 고정시킨 고정 시스템도 같은 지진파로 해석을 하여 각 타입별 EQS 적용 시의 응답 가속도와 비교하였다. 구조물이 저층의 단주 기 구조물이므로 층간 전단력, 층간 변위, 전도 모멘트는 분석 주요 인자가 아니라 사료되어 본 논문에 기술하지 않았다. 구조물의 가속도 응답은 EQS의 종류에 따라 각기 다른 값을 나타내었다. 그러나 EQS의 종류와 관계없이 EQS가 적용된 구조물의 응답 가속도는 입력 지진파의 가속도 및 고정 시스템의 응답가속도보다는 작은 값을 나타내었다. 이는 EQS의 적용이 구조물의 안정성을 높여줄 수 있다는 근거가 된다.

해석 결과 모든 EQS에서 면진 성능을 확인할 수 있었다. 특히 층고가 높은 지점일수록 면진 시스템은 고정 시스템에 비해 탁월한 가속도 감쇠 효과를 보여주었다. 고정 시스템의 경우 지면과 1층은 고정되어 입력 가속도 값과 일치하는 응답 가속도를 나타내지만, 층고가 높아질수록 가속도가 증폭되어 응답 가속도가 입력 가속도의 두 배에 가깝게 증가한다. 반면 EQS가 적용된 구조의 경우 전 층고에 걸쳐 비슷한 크기의 감쇠된 응답 가속도를 보인다. 이는 고정 시스템의 경우 지면과 1층이 고정된 상태로 높이에 따른 횡가동으로 인해 가속도가 증폭되는데 반해 EQS가 적용된 구조의 경우 구조물이 지반에서 격리되어 있는 상태로 전체가 미끄럼 거동을 하기 때문이다.

또한 모든 해석 결과에서 볼 수 있듯이 지진 가속도의 증가는 응답가속도의 증가로 연결되지 않는다. 입력 지진파의 최대 가속도는 0.154g에서 0.3g까지 두 배 가량 증가하였지만 응답 가속도는 입력 지진파의 최대 가속도에 큰 영향을 받지 않고 비슷하였으며 이러한 현상은 세 가지 종류의 EQS 모두 관찰할 수 있었다. 이를 통하여 EQS를 적용한 면진 시스템에 설계 시

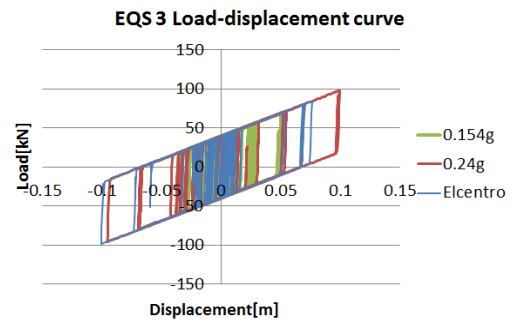


Fig. 16. A type EQS hysteresis curve

Table 5. Analysis results of A type EQS

Input motions	Node No. (floor)	Max response[m/sec <sup>2</sup> ]			Max disp [mm]	Max force [kN]
		Fix	EQS	decrease		
0.154g	35(ground)	1.51		-	50	70
	1(1st)	1.51	1.35	11%		
	896(2nd)	2.27	0.86	62%		
	730(3rd)	2.48	1.44	42%		
0.24g	35(ground)	2.35		-	99	98
	1(1st)	2.35	1.48	37%		
	896(2nd)	3.54	1.01	71%		
	730(3rd)	3.86	1.56	60%		
Elcentro	35(ground)	2.93		-	76	85
	1(1st)	2.93	1.87	36%		
	896(2nd)	4.51	1.18	74%		
	730(3rd)	6.15	1.58	74%		



예상한 지진보다 가속도가 큰 지진이 발생하여도 구조물의 응답가속도에 큰 변화가 없을 것이라는 것을 예상할 수 있다. 물론 Table 3, 4, 5에서 볼 수 있듯이 입력 가속도가 증가할 경우 응답 가속도는 증폭되지 않지만 구조물의 변위는 증가하게 된다.

항복강도가 작고, 2차 강성이 큰 A 타입의 경우 작은 항복강도로 인해 약한 지진파(0.154 g)에서는 적절한 거동을 나타내지만 중간 강도의 지진파(0.25 g)와 강한 지진파(Elcentro 지진파, 최대 지면 가속도 0.3g)에서는 최대변위가 지나치게 증폭되는 것을 확인할 수 있다. 전술한 바와 같이 항복강도가 낮을 경우 작은 진동에도 EQS가 예민하게 반응하여 변위가 발생하며 이러한 변위들이 누적될 경우 최대변위가 증폭되는 현상을 보인 것이다. 특히 Elcentro 지진파 해석 시에 설계변위를 넘어가는 최대변위가 발생하였다. 이러한 변위 증폭은 최대 수평력을 증가시켜 받침 및 구조물에 수평 하중을 증대시킨다.

항복강도가 크고, 2차 강성이 작은 C 타입의 경우 큰 항복강도로 인해 약한 지진파에서는 거의 면진 성능을 발휘하지 못한다. 특히 0.154 g 지진파 해석의 경우 1층에서 고정시스템과 거의 비슷한 크기의 응답 가속도가 나타났다. 반면에 최대변위는 세 EQS 중 가장 작은 값을 나타낸다.

EQS 적용 시 중요한 설계 인자는 EQS 설치 시 구조물의 응답 가속도와 변위 발생이다. 실제 현장에 반영된 EQS는 B 타입 EQS였다. 인도네시아의 Banda Aceh주는 약한 지진부터 강진까지 다양한 지진이 빈번하게 발생하는 지역이다. A 타입의 경우 우리나라와 같이 약한 지진이 발생하는 지역에는 적합할 수 있으나 현지에 강진이 발생할 경우 설계 변위를 뛰어넘는 변위가 발생하여 받침 자체의 파괴나 구조물의 붕괴 위험성이 있다. C 타입의 경우 과다 변위 발생을 억제할 수 있으나 약한 지진에서는 가속도 감쇠량이 부족한 것으로 판단되었다. 또한 약한 지진이 빈번하게 발생하는 현지의 정상 약한 지진에서도 진동 발생을 감쇠시켜 사용성을 증대 시켜줄 필요성이 있다. B 타입의 경우 세 지진에서 전 층에 걸쳐 25% 이상의 적절한 가속도 감쇠를 보여주었으며 최대 발생 변위도 설계 변위 이내로 제어할 수 있음을 보여주었다. 이와 같은 내용을 Table 6에 정리하였다.

Fig. 17의 왼쪽 사진은 실제 현장에 적용된 EQS의 사진이다. 완공 후 인도네시아 Banda Aceh주에는 규모 6.0 이상의 지진이 6회 발생하였으나, 2012년 5월 검침 결과 구조물의 외관 및 받침에는 파손 등의 이상이 없음을 확인할 수 있었다. EQS의 잔류 변위는 5 mm 정도로 미미한 편이었다.

**Table 6.** Analysis results of each types and choice of EQS

		0.154g	0.24g	Elcentro	choice
A type	EQS Max disp[mm]	64	140	151 (NG)	O
	Max response accel[m/sec <sup>2</sup> ]	1.11	1.15	1.26	
B type	EQS Max disp[mm]	60	106	109	
	Max response accel[m/sec <sup>2</sup> ]	1.16	1.69	1.35	
C type	EQS Max disp[mm]	50	99	76	
	Max response accel[m/sec <sup>2</sup> ]	1.44	1.56	1.87	

\* NG : Max displacement is larger than design on



**Fig. 17.** Installation of EQS and picture of EQS after earthquake

## 5. 결론

EQS의 건축물 적용과 설계 변수에 따른 구조물 거동 특성에 관한 연구를 진행하였으며, 이를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 단주기 건축 구조물을 시공할 경우 면진 받침을 통해 구조물을 장주기 시켜야할 필요성이 있다. 건축물에 면진 받침을 적용시킬 경우 다양한 설계범위, 변위 제어 및 복원 기능, 높이 단차 조절 기능, 내구성 등의 조건을 만족시켜야 한다. EQS는 이와 같은 조건들을 만족 시키며 건축물 적용에 적합한 구조 및 거동을 지닌다.
- 2) EQS는 적용 대상 건축물을 장주기화 시켜 안정성을 높이고 구조물의 응답 가속도를 감쇠시키는 역할을 할 수 있음을 지진 해석을 통하여 확인하였다.
- 3) EQS의 설계 변수로는 마찰재를 통하여 조절하는 항복하중과 폴리우레탄 스프링을 통하여 조절하는 2차 강성이 있다. 두 변수는 개별적인 설계가 가능하며 설계 변수를 조정함에 따라 구조물의 가속도 응답 및 변위가 바뀐다. 따라서 적용 현장의 조건에 따라 적합한 EQS를 설계해서 적용해야 하며, 이와 같은 내용을 실제 EQS가 적용된 구조물의 지진 해석 결과를 통하여 확인하였다.

## / 감사의 글 /

본 연구는 한국 에너지 기술 평가원의 원자력 융합 원천기술 개발 사업(원전 구조용 면진장치의 국산화 개발, 2011151010010D)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사의 뜻을 전합니다.

## / REFERENCES /

1. Park HG, Lee YI, Jung DY. Experimental and Analytical Study of the Dynamic Behavior of a Polyurethane Spring Restoring Disk Bearing. Journal of the earthquake engineering society of Korea, 2011 April;15(2):61-69.
2. Lee DG, Kim TH. Application of seismic isolation and vibration control in Korea. Journal of the earthquake engineering society of Korea, 2006 Dec;10(6):67-77.
3. Lee YI, Yu SM, Choi DS, Ji YS. The seismic performance evaluation of EQS through the Indonesia ICT center case study. 2012

- Computational structural engineering institute of Korea annual conference, 2012 Mar.
4. Chun HM, Base isolation systems for building structures, Journal of Korean society of steel construction, 2004 Sep;16(3):51-55.
  5. Jung DY, Dynamic and Long-term Behavioral Characteristics of Sliding Isolation Disk Bearing with Polyurethane and PTFE, A Ph.D. thesis of university of Incheon, University of Incheon, 2012 Feb.
  6. Bang IS, Experiences of sliding isolation disk bearing in Korea, 7th world congress on joints bearings and seismic systems for concrete structures, Las Vegas, Nevada USA;c2011.
  7. Paz, Mario, Structural Dynamics: Theory and Computation, 2004.