

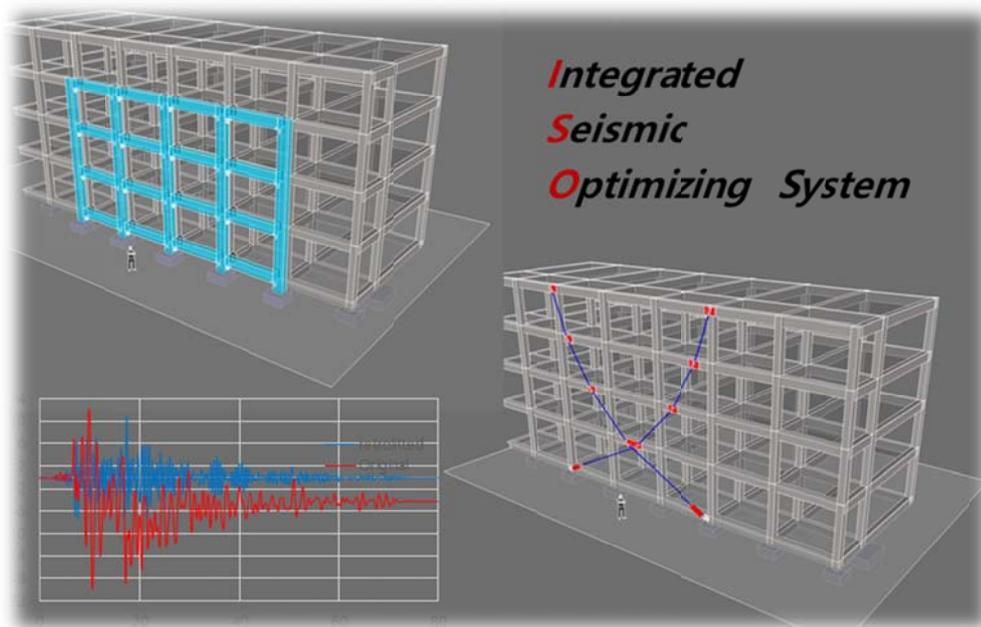
자가 복원력을 갖는 내진보강공법의 해석모델 개발 및 내진성능평가

Development of Analysis Models and Seismic Performance Evaluation
of Seismic Retrofit Systems with Self-Centering Capacity

2017.05

연구기관 성균관대학교건축공학과

주관기관 한국지진공학회



|| (주)유경시스템

|| (주)위너스BDG

제 출 문

(주)유경시스템 귀하

본 보고서를 “자가 복원력을 갖는 내진보강공법의 해석모델 개발 및 내진성능평가” 용역 최종보고서로 제출합니다.

2017년 05월 01일

주관기관 한국지진공학회 회장 신수봉



■ 연구기관: 성균관대학교 건축공학과

연구책임자	김진구	교수/공학박사
연구원	Mohamed NourEldin	공학박사
연구원	Asad Naeem	공학석사

■ 참여연구진: (주)유경시스템

참여연구자	김성진	기술상무
참여연구자	황성호	기술이사/공학석사
참여연구자	조정식	차장/공학석사

■ 참여연구진: (주)위너스 BDG

참여연구자	이 석	대표이사/건축구조기술사
참여연구자	김영직	전무이사/공학박사

요 약 문

본 연구에서는 초기 긴장력이 가해진 강선을 이용하여 건축물의 자가 복원력을 제공하는 두 종류 내진보강공법의 비선형 해석모델을 개발하고, 이를 이용하여 제안된 보강기법의 내진성능을 평가하였다.

초기 장력이 가해진 강선을 이선형 스프링으로 모델링하고 비선형해석 소프트웨어인 SAP 2000을 이용하여 보강장치 설치 전후 건축구조물의 비선형 정적 및 동적 해석을 수행하였다. 그 결과 지진에 의한 변위 응답이 상당히 감소하여 충분한 내진보강 효과가 있는 것으로 나타났다.

본 연구에서 제안된 공법을 적용하여 구조물을 보강할 경우 타 공법에 비해 비교적 단순하고 공사기간과 비용을 절감할 수 있어 내진시스템이 구비되어 있지 않은 노후 구조물 뿐만 아니라 신축구조물의 내진보강에 효과적으로 적용할 수 있을 것으로 예상된다.

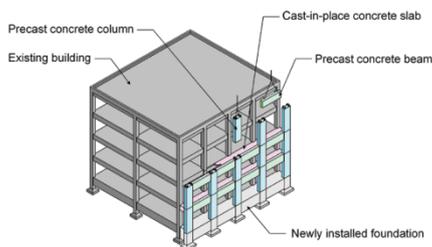
자가 복원력을 갖는 내진보강공법의 해석모델 개발 및 내진성능평가

Development of Analytical Model and Seismic Retrofit of a Seismic Retrofit System with Self-Centering Capacity

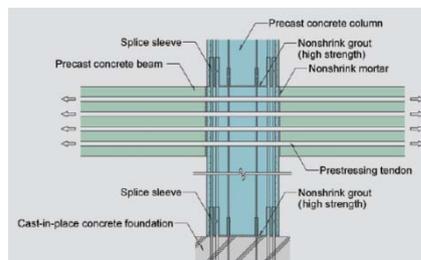
1. External prestressed precast concrete frames (EPPCF)

1.1 기술의 개요

- 기존 건물의 외부에 PC PS 골조를 보강 설치하여 강성 및 강도를 증가시키고 내진성능을 향상하는 보강공법임 (Fig. 1(a)).
- PS 강선을 이용하여 구조물의 내진성능을 향상하는 기법은 RC 골조뿐 아니라 RC 전단벽이나 강구조에도 적용 가능함
- PS 강선을 통한 초기하중은 보와 기둥 모두 가력이 가능하나 주로 보에 설치한 강선을 통하여 가하는 것이 일반적임 (Fig. 1(b)).
- 외부 골조는 기존 골조와 PS bar나 PC 슬래브를 이용하여 결합됨 (Fig. 2)
- 외부 골조는 기존 구조의 기둥 위에 설치하거나 기존 기초를 확장하여 설치할 수 있음
- 지진력이 작용하여 PC 외부 골조에 휨 변위가 발생하면 보 내부에 설치된 PS 강선에 인장력이 작용하고, 작용하는 인장력이 초기 긴장력을 초과하면 보와 기둥이 벌어지며 강선의 길이가 증가하여 탄성 복원력이 발생함 (Fig. 3).



외부 설치 형태



강선의 배치

Fig. 1 External pre-stressed precast concrete frames

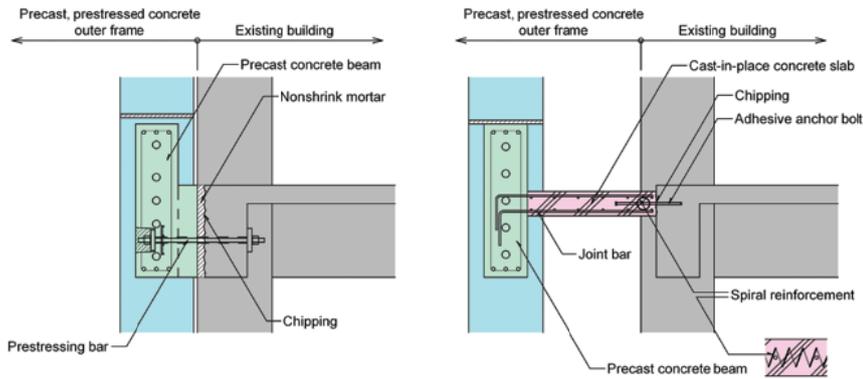
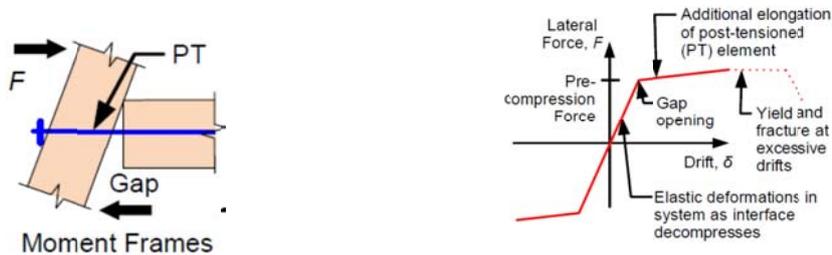


Fig. 2 EPPCF와 기존 구조체의 연결방법



Gap opening

강선의 힘-변위관계

Fig. 3 Force-displacement relationship of tendons before and after gap opening

- 보강되는 구조체를 외부에 부착하는 형식으로 내부 구조의 변경이나 보강이 불필요함
- 설치 작업이 외부에서 진행되므로 실내사용에 방해 받지 않음
- 추가되는 구조보강용 보와 기둥이 기존 건물의 외부 보 및 기둥을 따라 설치되므로 환기와 조망권을 유지함
- 보강용 PC부재를 공장에서 제작하여 현장에서 조립하여 공사 기간이 단축됨
- prestress력의 크기, tendon의 굵기 및 개수 등을 조정하여 외부 골조의 강성이나 강도를 쉽게 조정할 수 있음
- 자가복귀 (self centering) 기능으로 건물을 원 상태로 복귀하는 것이 가능하여 지진이 발생한 후 보수 비용이 절감됨

1.2 Analysis modeling

- Tendon의 stress-strain 관계

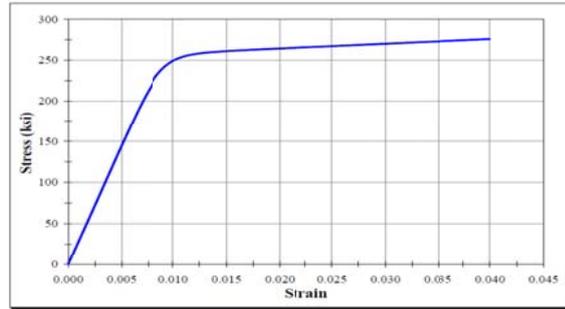


Figure 4.8: A theoretical stress-strain curve proposed for Grade 270 prestressing strands by Mattock [4.12].

Fig. 4 Stress-strain relationship of tendons

$$f_{pt} = \varepsilon_{pt} \cdot E_p \cdot \left[0.020 + \frac{0.98}{\left[1 + \left(\frac{\varepsilon_{pt} \cdot E_p}{1.04 \cdot f_{py}} \right)^{8.36} \right]^{\frac{1}{8.36}}} \right]$$

- Preloaded tendon의 해석모델

Posttensioning tendon

Yield strength, f_{py}

Initial stress after losses, f_{pi}

1,757 MPa^a

820 MPa^b

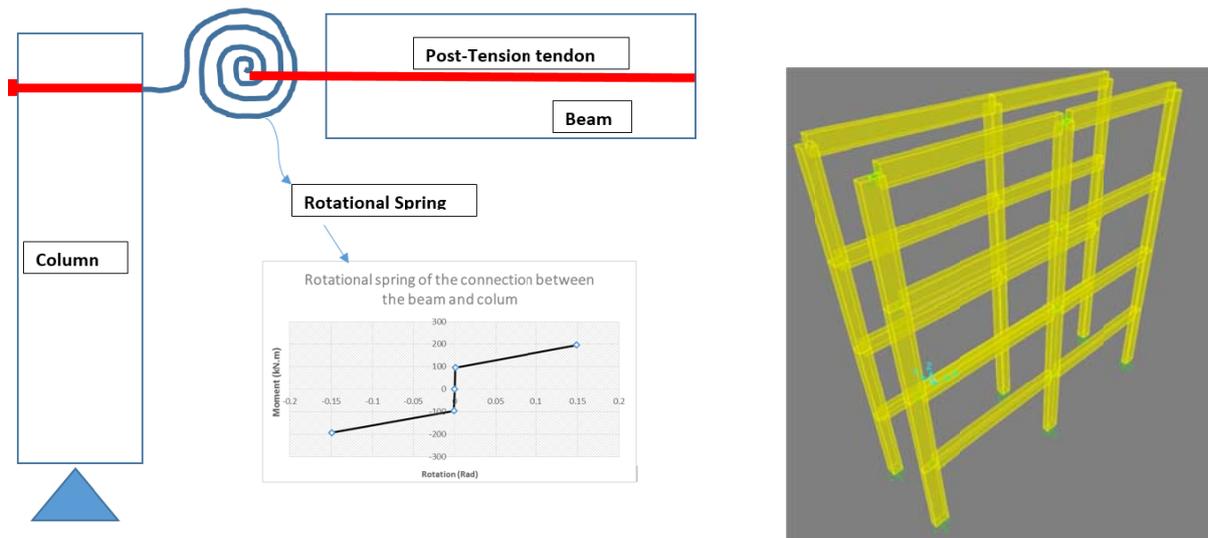


Fig. SAP 2000 해석 및 2D 모델링

- 2D 2경간 4층 모멘트골조에 동일한 PC골조를 부착하여 보강.
- 보와 기둥의 단면 : 400x600 mm
- 적용 강선 및 Preload

Diameter of tendon = 0.5 inch

No. of tendons/ beam (at center) = 3.0

The decompression force (start of gap) = $(820 \times 1000 \text{ kN/m}^2) \times (3.8 \times 10^{-4}) \times (0.6/2) \times (1000) = 94.0 \text{ kN.m}$

The yield strength = $(1720 \times 1000 \text{ kN/m}^2) \times (3.8 \times 10^{-4}) \times (0.6/2) \times (1000) = 196.0 \text{ kN.m}$

The corresponding strain at start of gap is assumed very small (0.00002)

The corresponding strain at start of tendon yield is (0.01); tendon Diameter=0.5 inch and Number of tendons =3

보 중앙에 위치한 세 가닥의 0.5" 강선에 820 MPa의 prestress를 가한 경우 외력에 의하여 PC 보에 94 kNm의 모멘트가 발생할 때 보와 기둥의 접합부가 벌어지기 시작함 (gap opening)

이때 강선에는 인장력이 가해지기 시작하며 복원력이 발생함

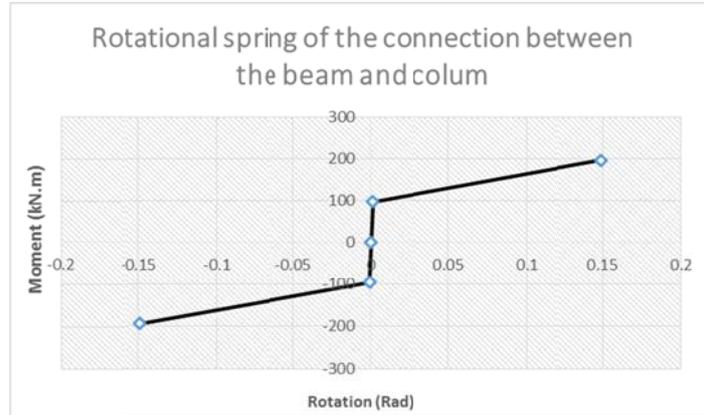
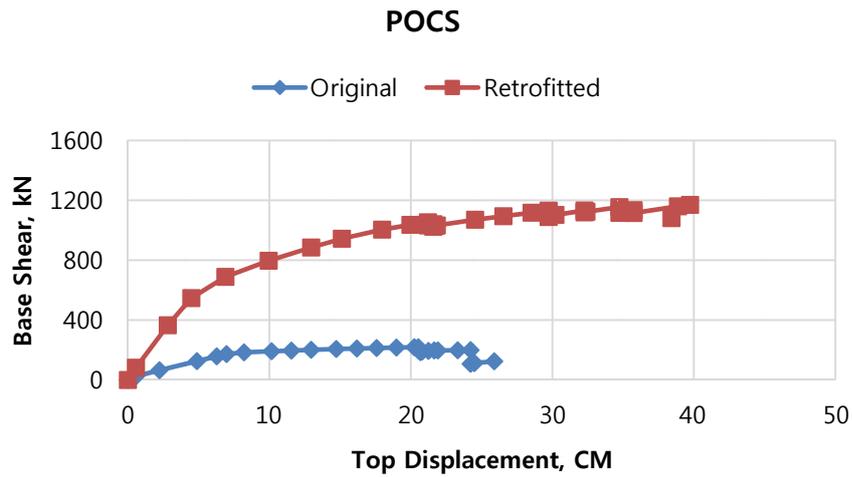


Fig. Moment-Rotational relation of the spring between the beam and column

1.3 해석 결과

- Preloaded PC 설치 전후의 pushover curve

EPPCS 설치 후 최대 강도가 3배 이상 증가



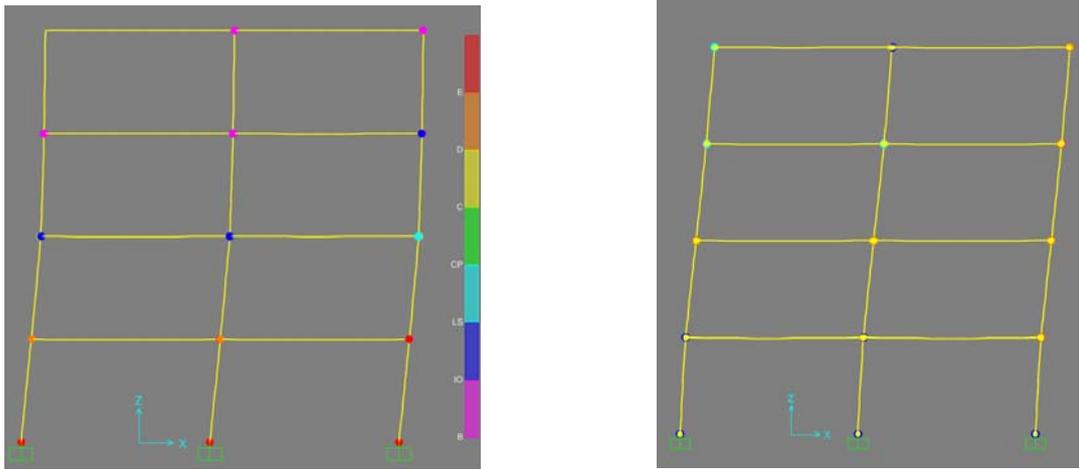
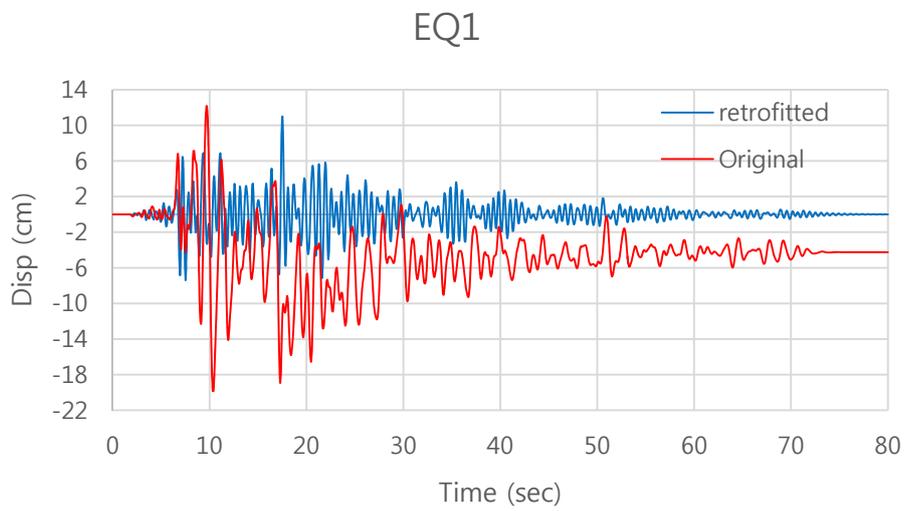
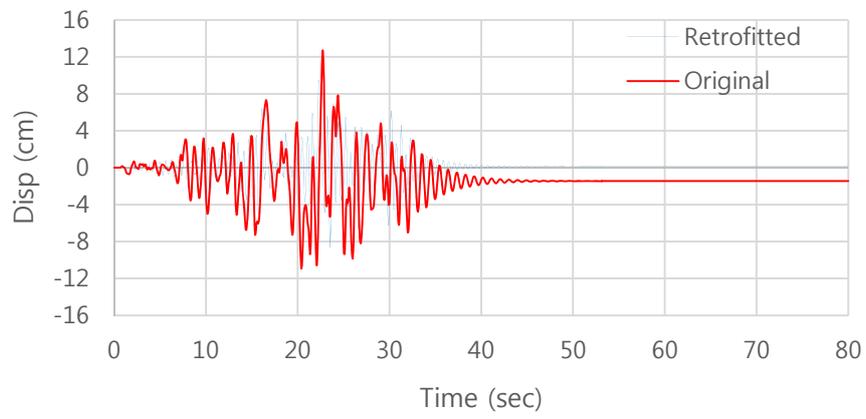


Fig. Preloaded PC 설치 전후 최대강도에서의 소성힌지 분포

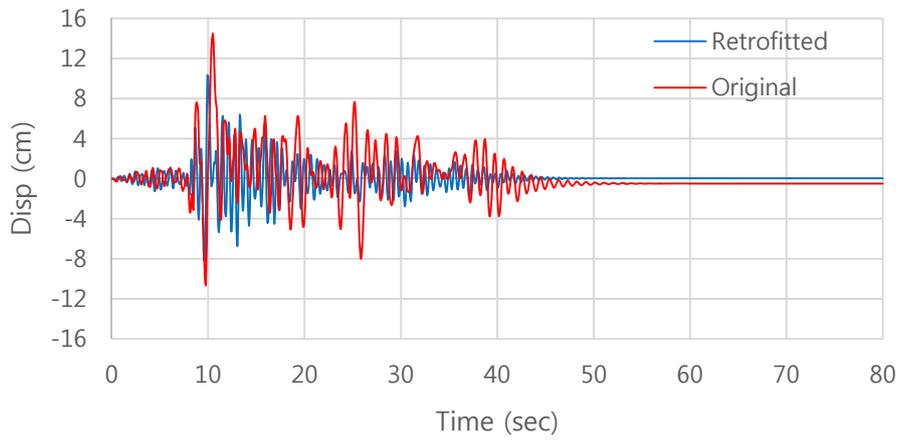
- Preloaded PC 설치 전후의 변위 시간이력 해석결과



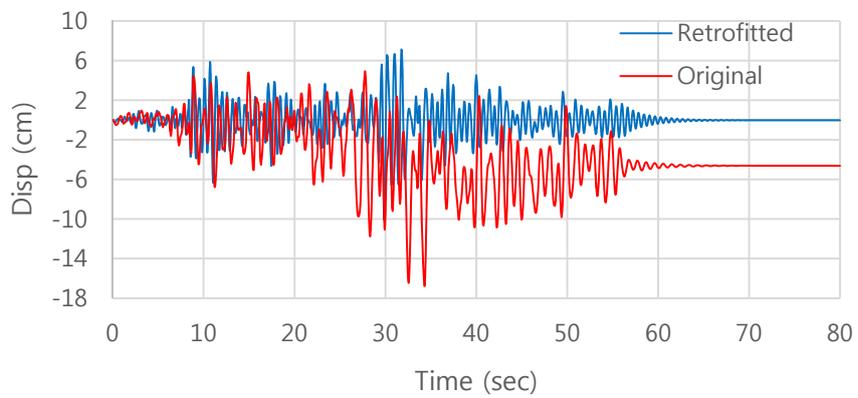
EQ2



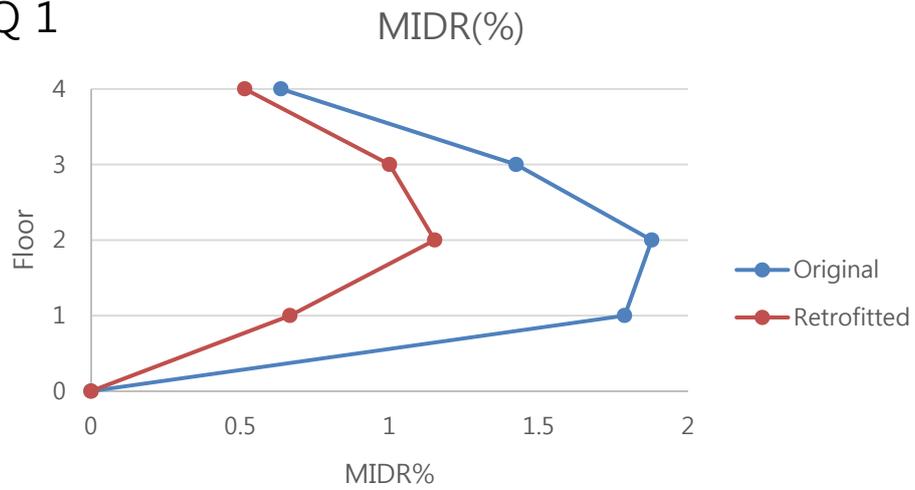
EQ3



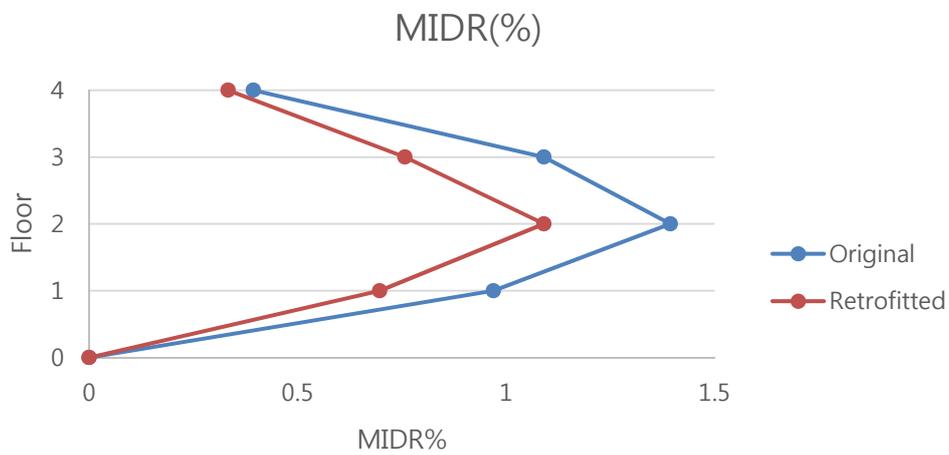
EQ4



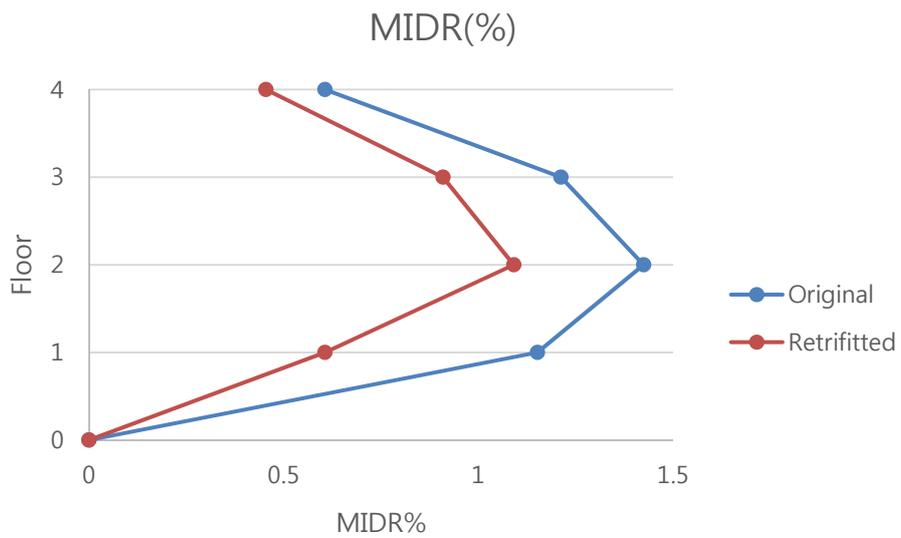
EQ 1



EQ 2



EQ 3



EQ 4

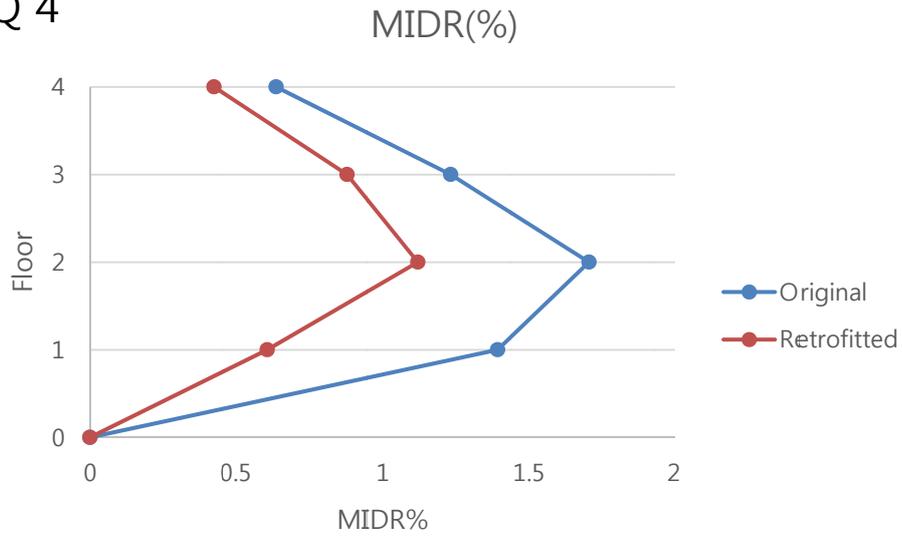
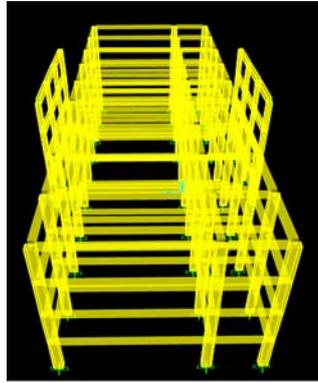


표 1. 지진에 대한 최대 층간 변위 비교

Bare Frame model			
Earthquake records	Max. Disp. (mm)	Residual Disp. (mm)	층간변위 (%)
Kern County	200	131	1.8
Tabas	125	15	1.45
Cape Mendocino	150	5	1.45
Landers	175	50	1.75
Retrofitted Frame			
Earthquake records	Max. Disp. (mm)	Residual Disp. (mm)	층간변위 (%)
Kern County	110	0	1.1
Tabas	90	0	1.1
Cape Mendocino	105	0	1.05
Landers	70	0	1.1

1.3 Pushover 해석결과 (3D 모델)



3D MODELING

- 4층 9경간 3D 모멘트골조 해석모델의 양쪽에 장변 방향으로 4층 3경간, 6경간, 9경간 PPCF를 설치하고 1차모드 형태의 하중으로 비선형 정적 해석 수행.
- 3 tendons used with tendon Diameter=0.5 inch; Total Area of tendons=3.8 cm²
- PPCF 경간의 수를 증가시킨 경우와 강선의 수를 두 배로 증가시킨 경우도 비교함.

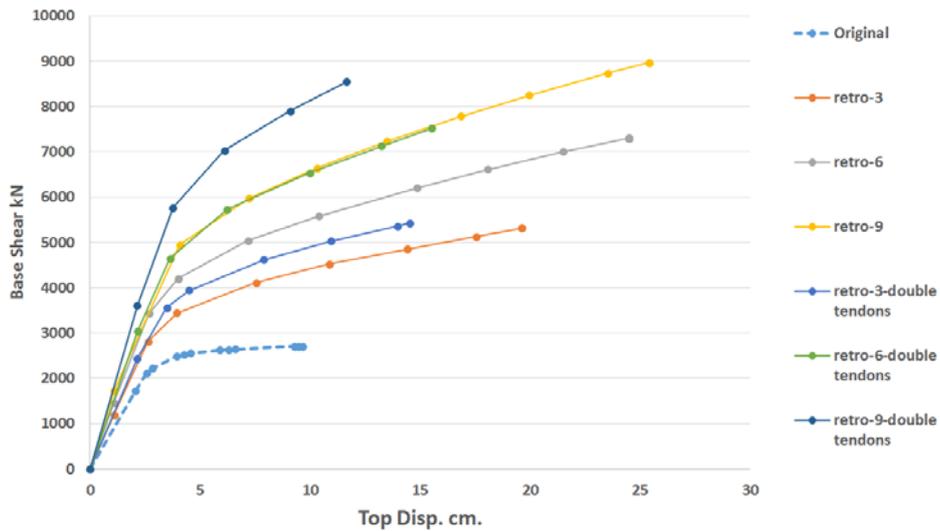


Fig. Pushover Curve

- 3경간 PPCF 설치 후 기존 비 보강 건물의 항복 강도 및 연성도가 50 % 이

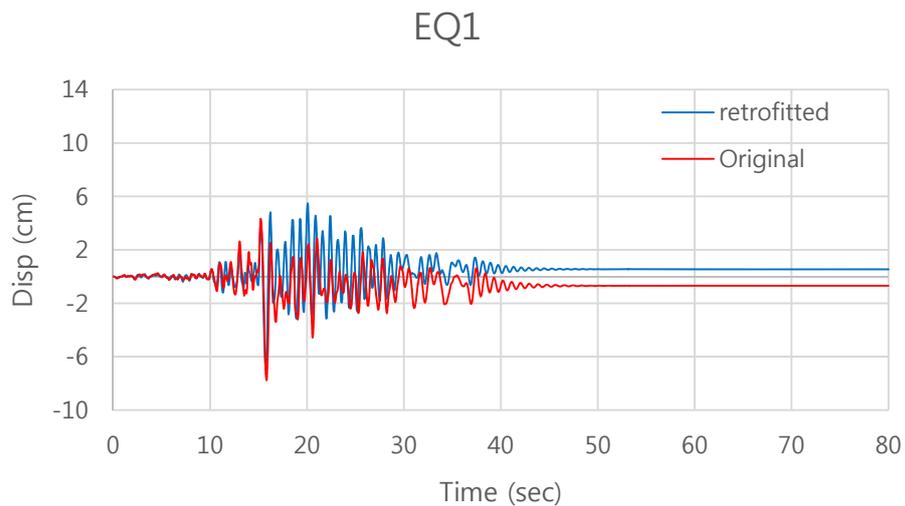
상 증가한 것으로 나타남.

- PPCF 경간의 수 및 설치 강선의 개수가 증가할수록 강성 및 강도가 증가

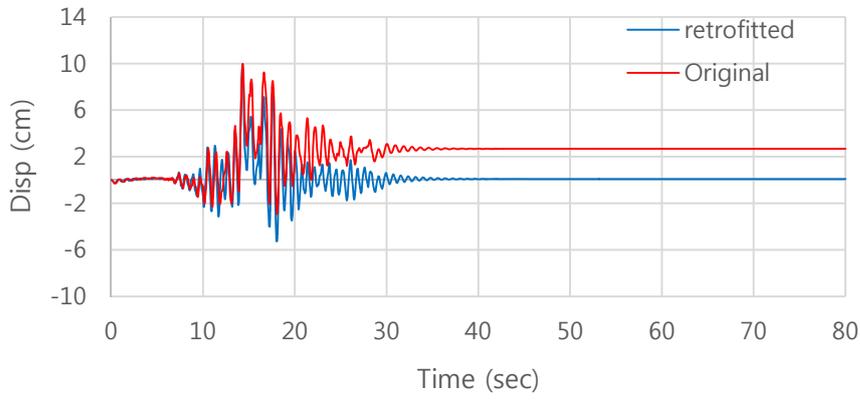
1.4 비선형 동적해석

- 세 개의 지진에 대한 최대 층간 변위의 시간이력 해석결과를 나타냄.
- PPCF의 경간은 3, 6, 9 세가지 이며, 강선의 단면적은 3.8, 7.6 cm² 두 가지로 보강한 경우에 대하여 해석결과를 보강하지 않은 결과와 비교함

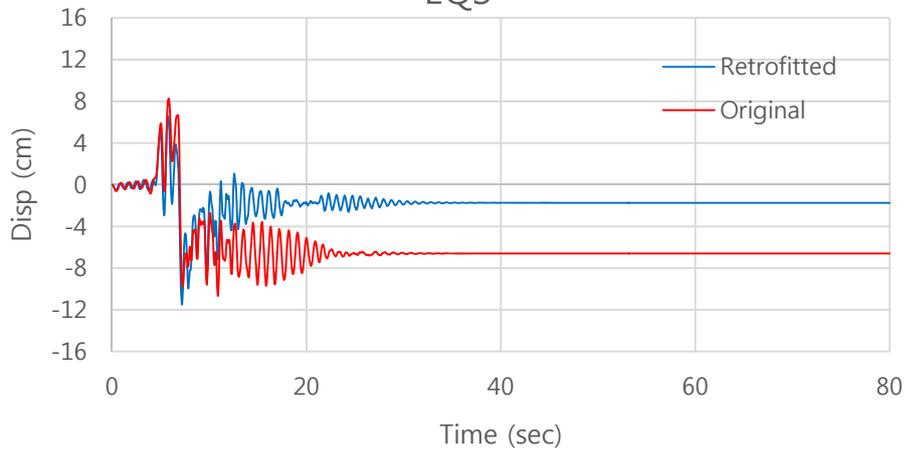
(1) 3-bay 3.8 cm² tendons



EQ2

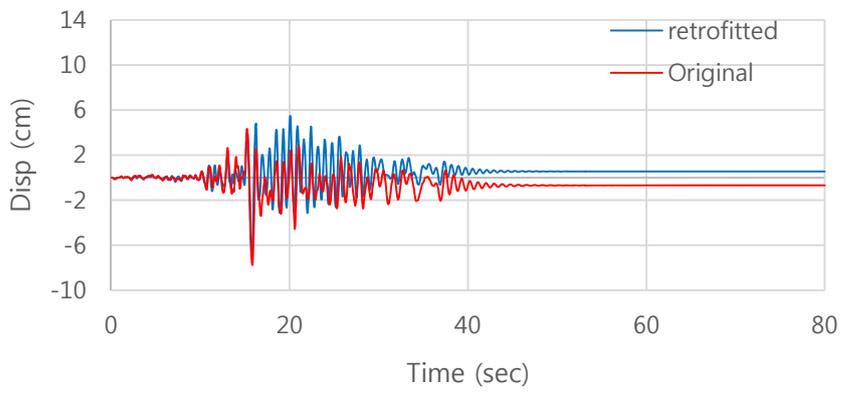


EQ3

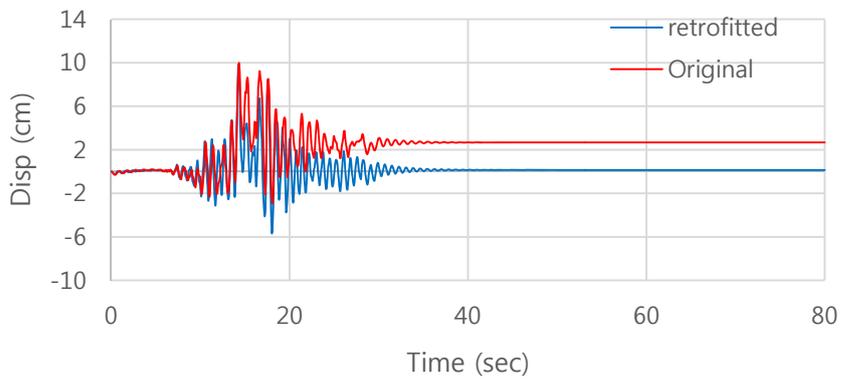


(2) 3-bay 7.6 cm^2 tendons

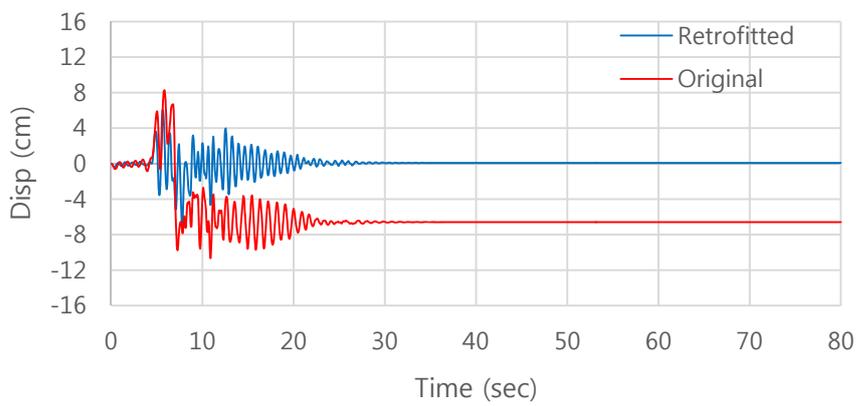
EQ1



EQ2

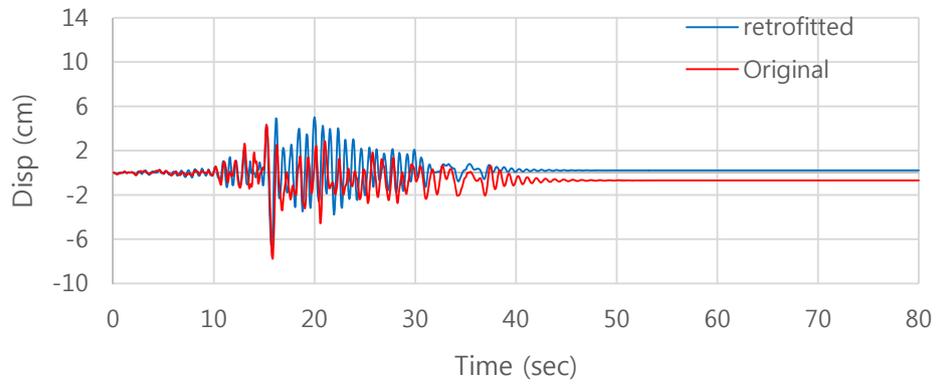


EQ3

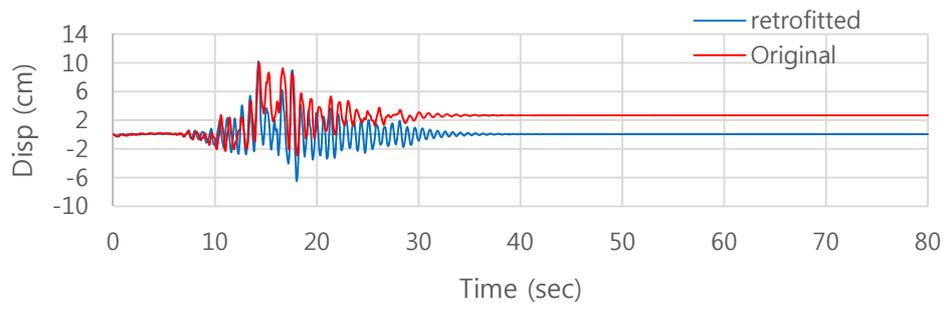


(3) 6-bay 3.8 cm² tendons

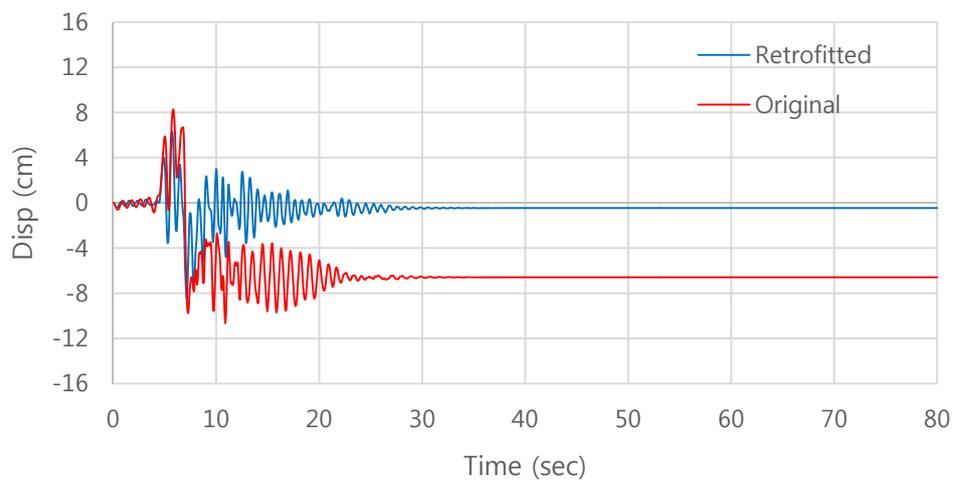
EQ1



EQ2

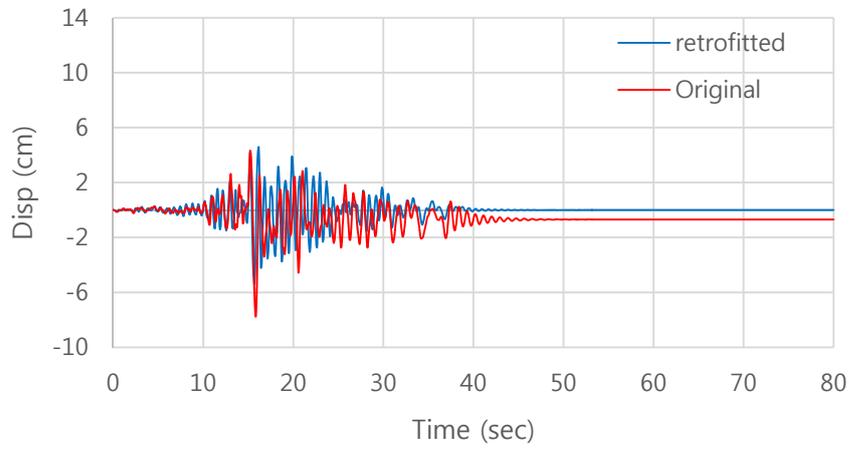


EQ3

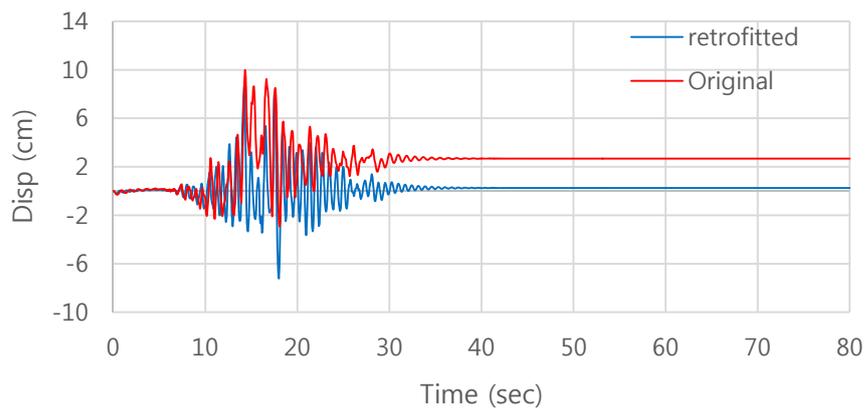


(4) 6-bay 7.6 cm² tendons

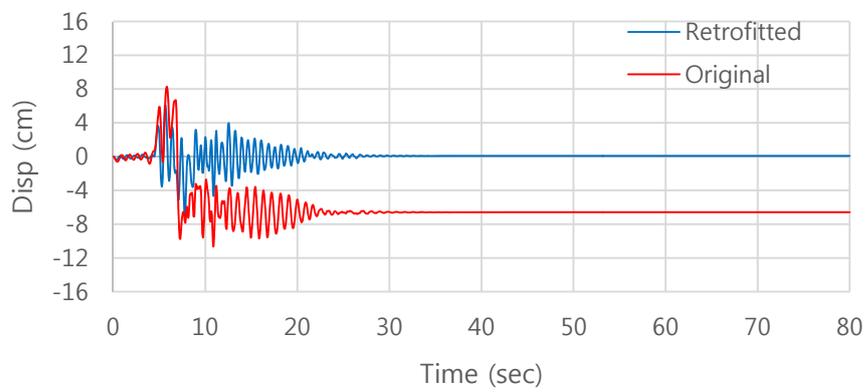
EQ1



EQ2

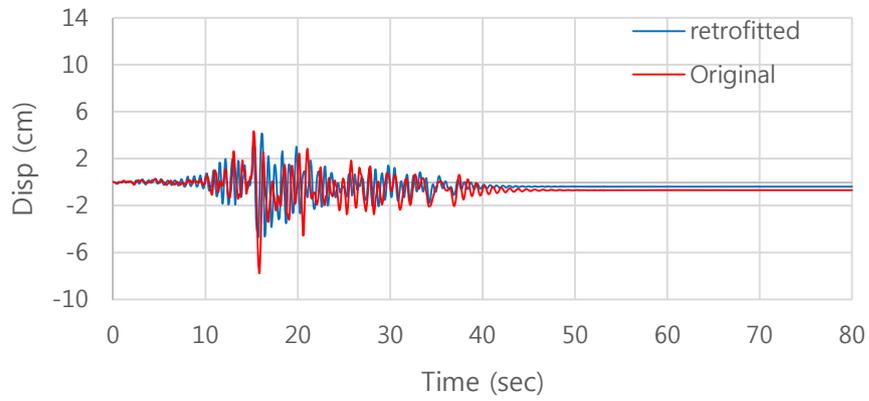


EQ3

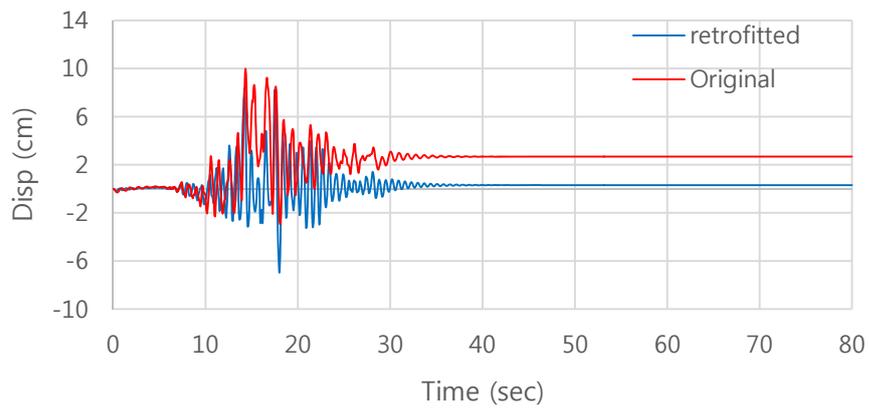


(5) 9-bay 3.8 cm² tendons

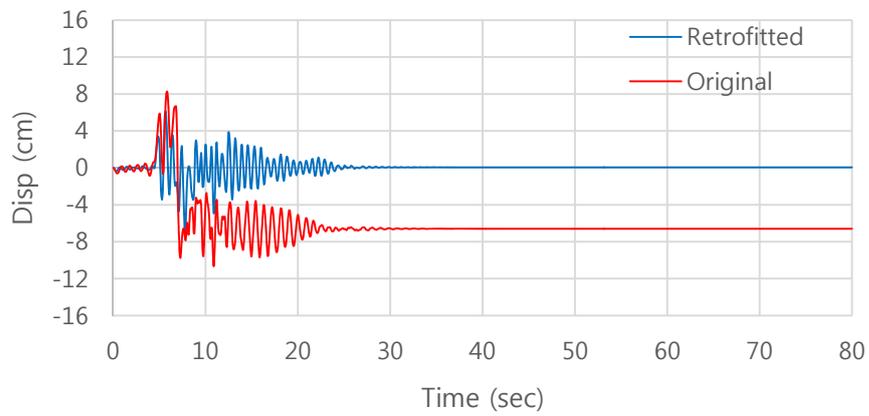
EQ1



EQ2

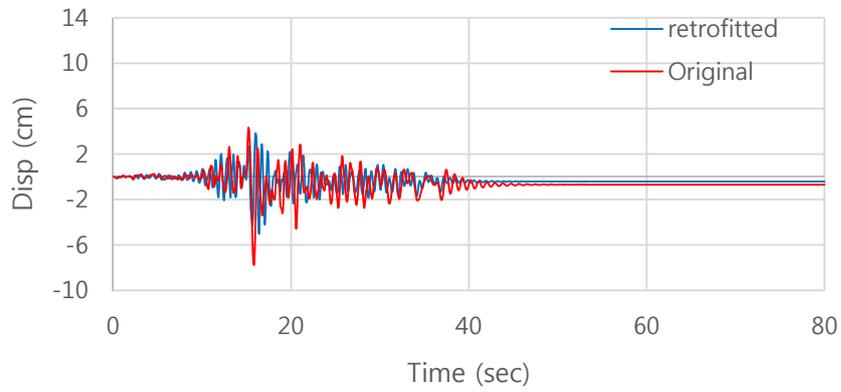


EQ3

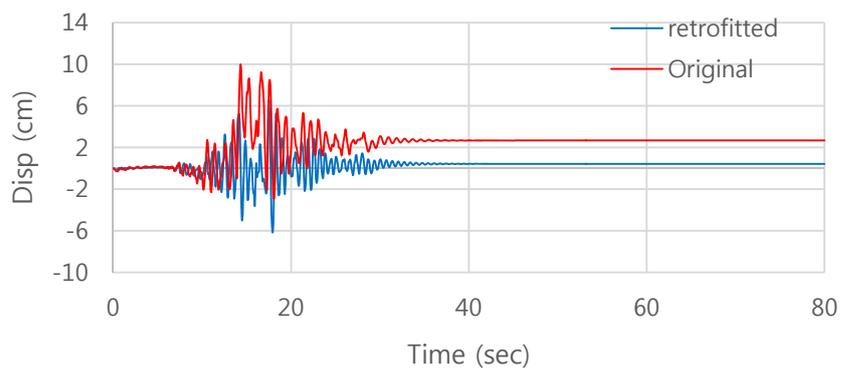


(6) 9-bay 7.6 cm² tendons

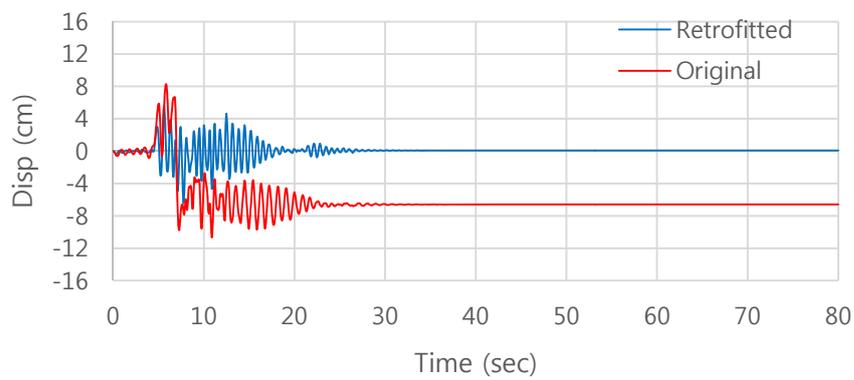
EQ1



EQ2

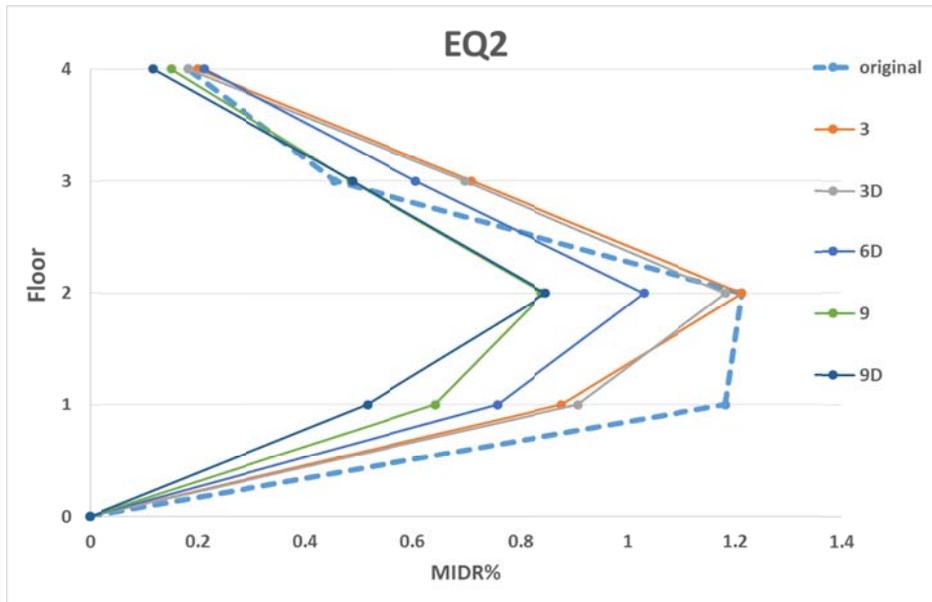
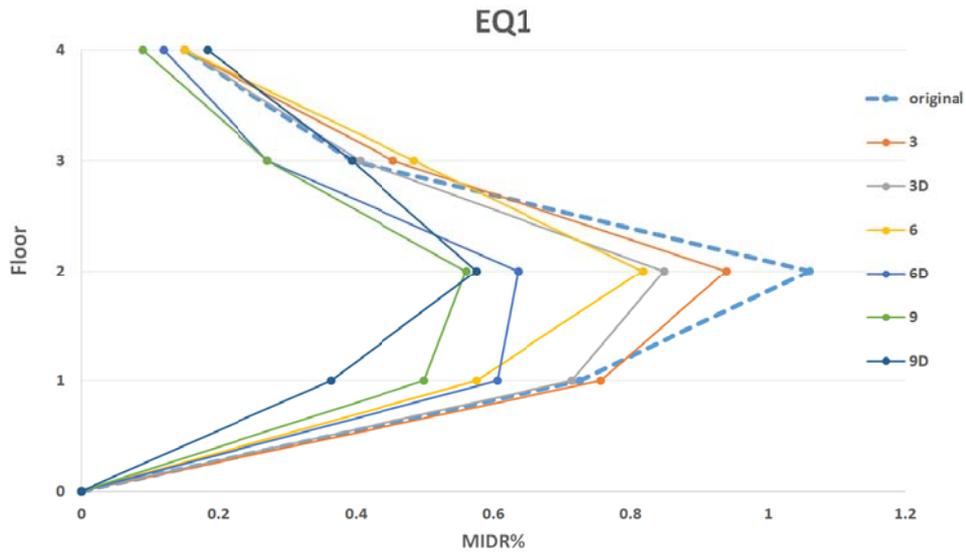


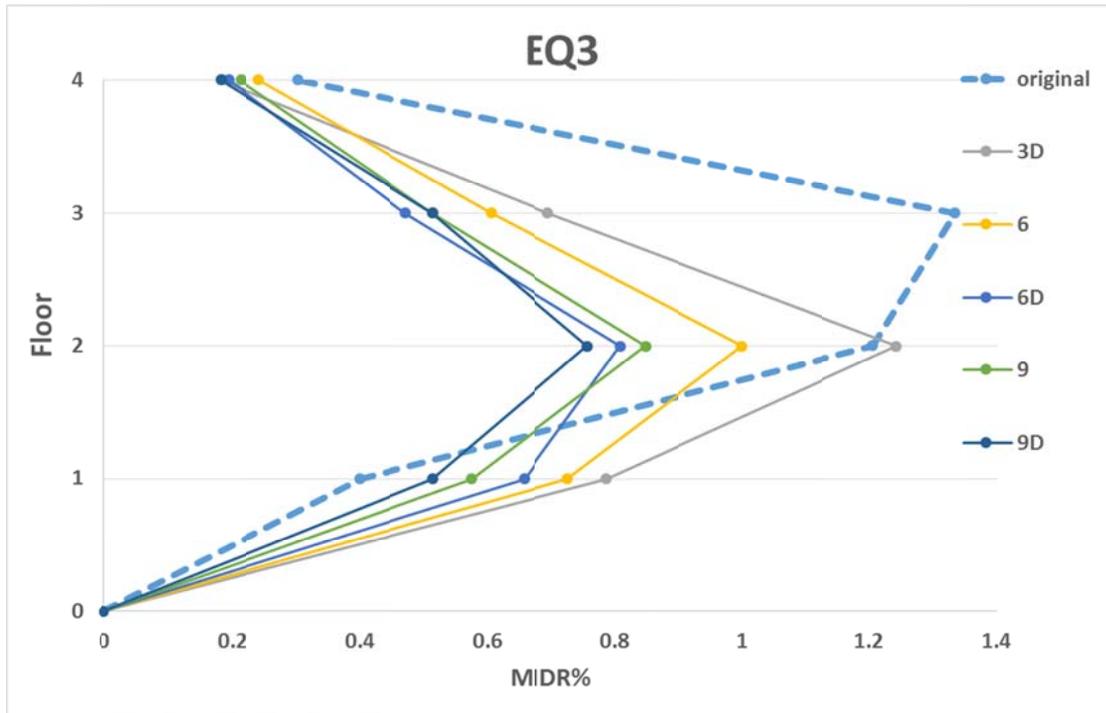
EQ3



- PPCF 설치 후 동적 해석에 의한 최대 층간 변위는 대체로 감소하며, 특히 잔류 변위의 저감효과가 큰 것으로 나타남.

(7) 동적 해석에 의한 최대 층간 변위





- 위의 그림에서 D는 강선 단면적이 두 배 (7.6 cm^2)인 것을 의미함.
- PPCF 경간의 수를 3, 6, 9개로 증가하거나 강선의 단면적이 증가할수록 층간변위가 대체적으로 감소하는 것으로 나타남.

1.5 소결

- 비 내진구조물의 내진보강을 위하여 EPPCS 설치 후 강성과 강도가 대폭 증가함
- 4가지의 지진기록을 이용한 비선형 동적 해석 결과 EPPCS 설치 후 최대변위, 최대 층간변위, 잔류변위 등 모든 응답이 감소하며 기준에서 요구하는 성능수준을 만족하는 것으로 나타남.

2. Preloaded Viscous Dampers with Cables

2.1 기술의 개요

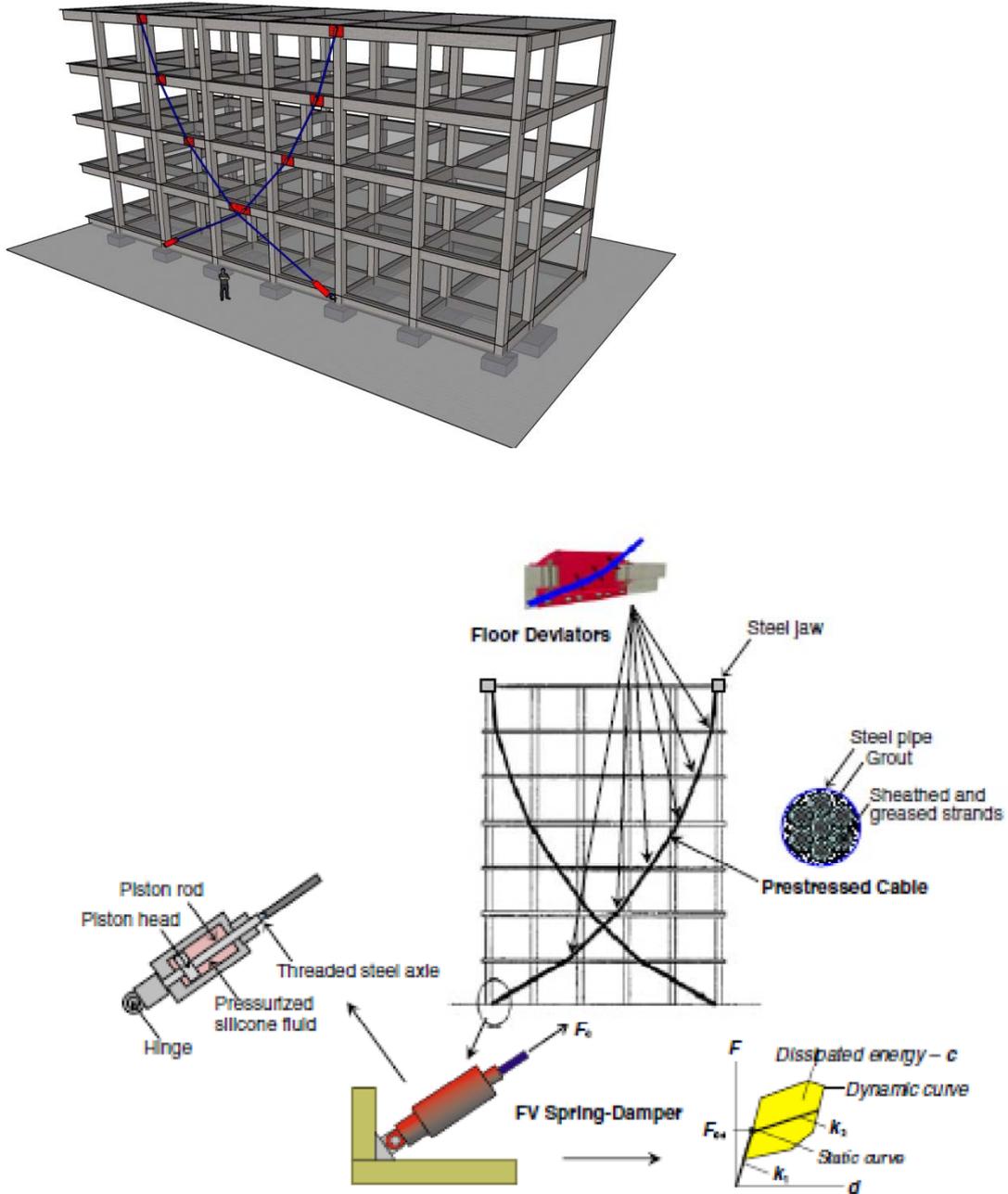
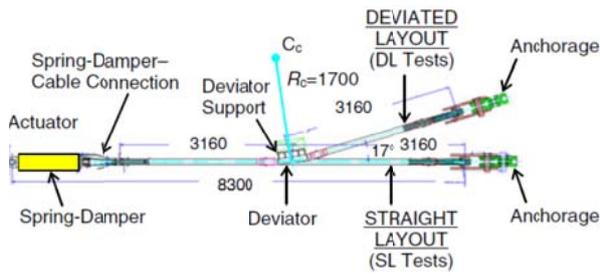
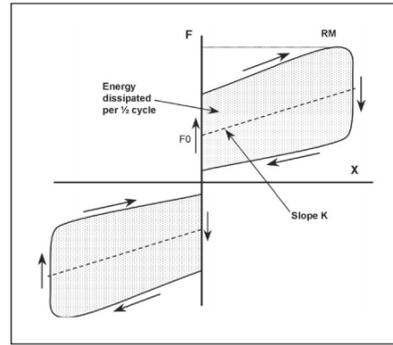


Fig. 1 DCS(Damped Cable System) 구성 및 설치형상



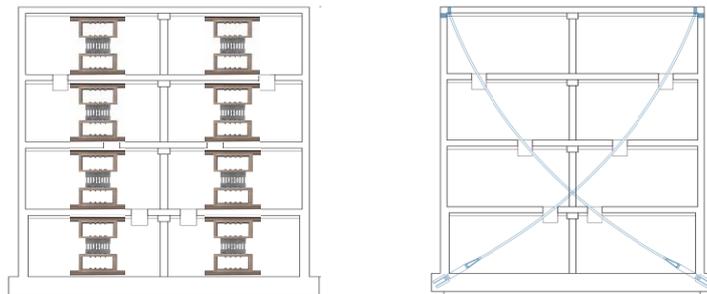
(a) 시스템 구성



(b) 힘-변위관계

Fig. 2 Force-displacement relationship of DCS

- 고강도 Tendon을 이용하여 내부에 스프링이 장착된 점성 댐퍼에 초기장력을 가함으로써 점성댐퍼의 에너지소산기능과 스프링을 이용한 자가복귀 (self centering) 기능을 동시에 보유하고 있는 내진보강장치임
- 점성댐퍼가 작동한 후 발생한 변위는 지진이 끝난 후 댐퍼 내부 스프링의 작용으로 원 상태로 복귀할 수 있는 복원력이 발생함
- 건물의 외부에 설치되므로 내부 구조의 변경이 필요 없음
- 강재댐퍼, 마찰댐퍼, 강성보강 등 기존의 보강기법은 국부적 보강기법이며, 결과적으로 많은 수의 댐퍼 개수가 필요하지만, 제안된 시스템은 건물의 전체 높이에 설치되는 광범위한 보강기법이므로, 보강 효율이 높아 장치의 개수를 줄일 수 있음.



- 세장한 강선을 이용하므로 철골 가새 보강에 비하여 조망권을 충분히 확보할 수 있음
- 자가복귀 (self centering) 기능으로 건물을 원 상태로 복귀하는 것이 가능하여 지진이 발생한 후 보수 비용이 절감됨

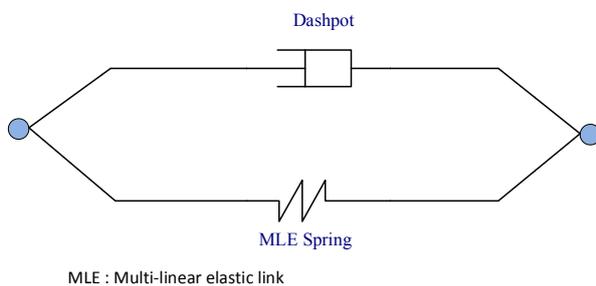
2.2 해석모델링

- DCS의 힘-변위 관계식

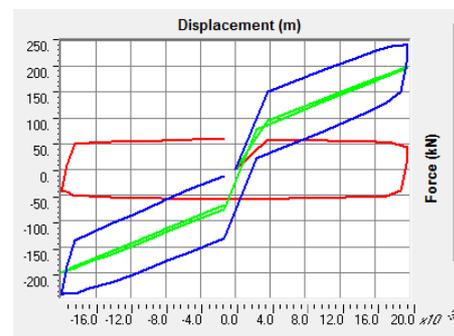
$$F_{nc}(t) = k_2x(t) + \frac{(k_1 - k_2)x(t)}{\left[1 + \left|\frac{k_1x(t)}{F_0}\right|^R\right]^{1/R}}$$

k_1 and k_2 are the stiffness before and after reaching pretension F_0 , and R = curvature exponent (≈ 5).

- 케이블 초기장력 F_0 는 댐퍼 내부 스프링의 탄성력과 동일함
- DCS 시스템은 SAP 2000 해석모델
- DCS 시스템의 해석모델은 viscous damper를 나타내는 dashpot과 prestressed cable을 나타내는 multi-linear spring을 병렬로 결합하여 표현 가능함



(a) 해석모델



(b) 힘-변위관계

Fig. 3 시스템 SAP 2000 해석모델

- DCS 시스템의 힘 - 변위 관계

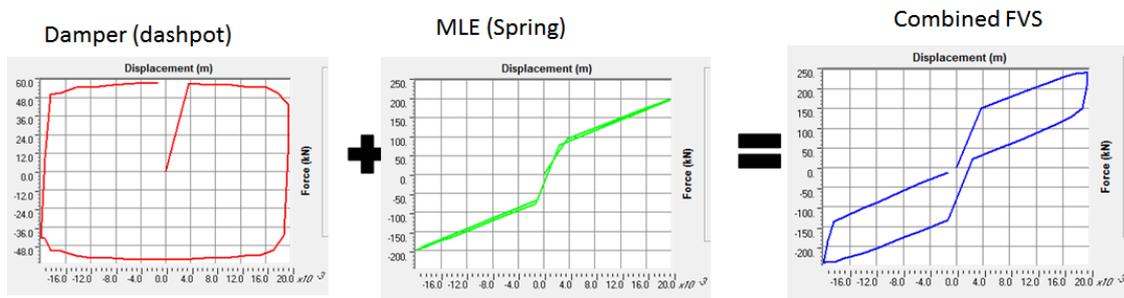


Fig. 4 DCS 이력곡선

- 설치 DETAIL

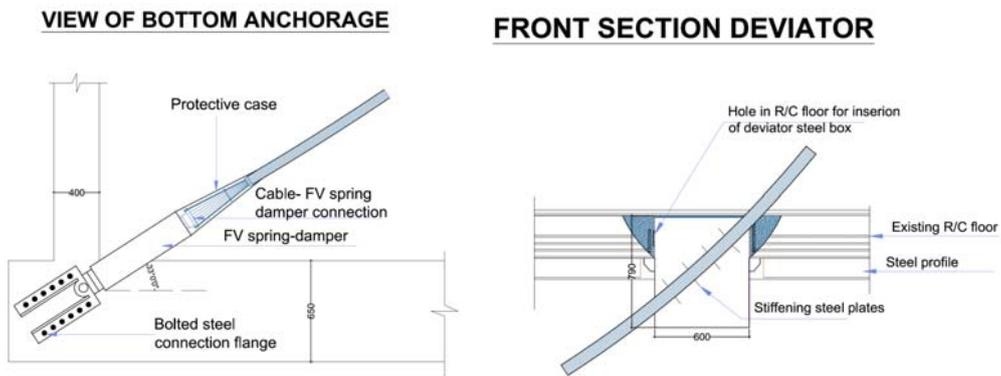
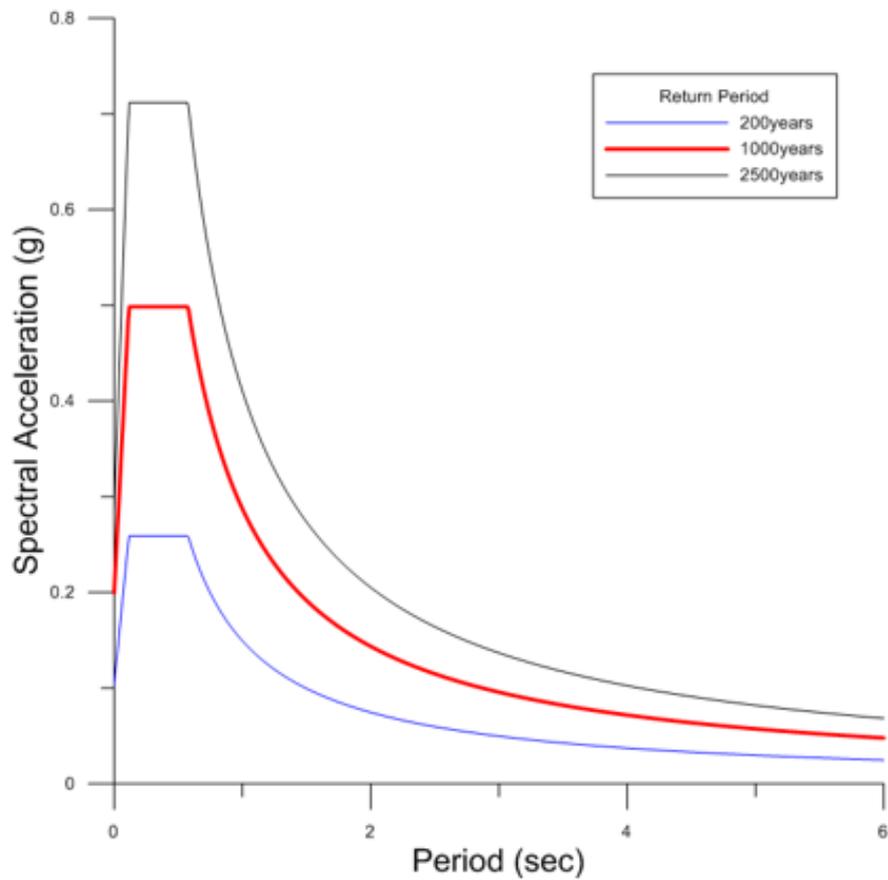


Fig. 5 Connection 개념도

2.3 설계하중 (KBC 2016 설계스펙트럼)

다양한 지진 기록을 KBC 2016 스펙트럼을 이용하여 SCALING



2.4 해석결과

Parameters used for retrofitting the structure

- Area of cable $A_c = 900 \text{ mm}^2$
- Preload = 200 kN
- K_2 for spring damper = 6500 kN/m
- $K_1 = 15K_2$
- Damping coefficient (C) = $150 \text{ kN(m/s)}^\alpha$
- $\alpha = 0.15$

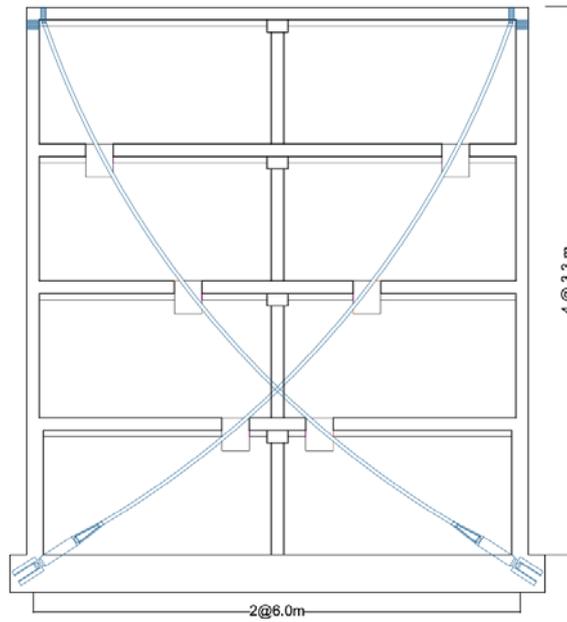
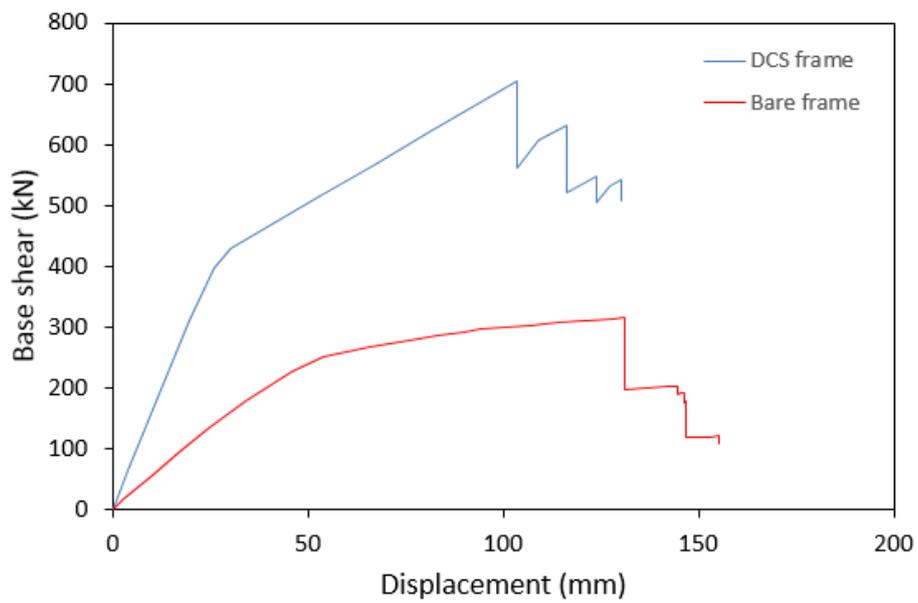


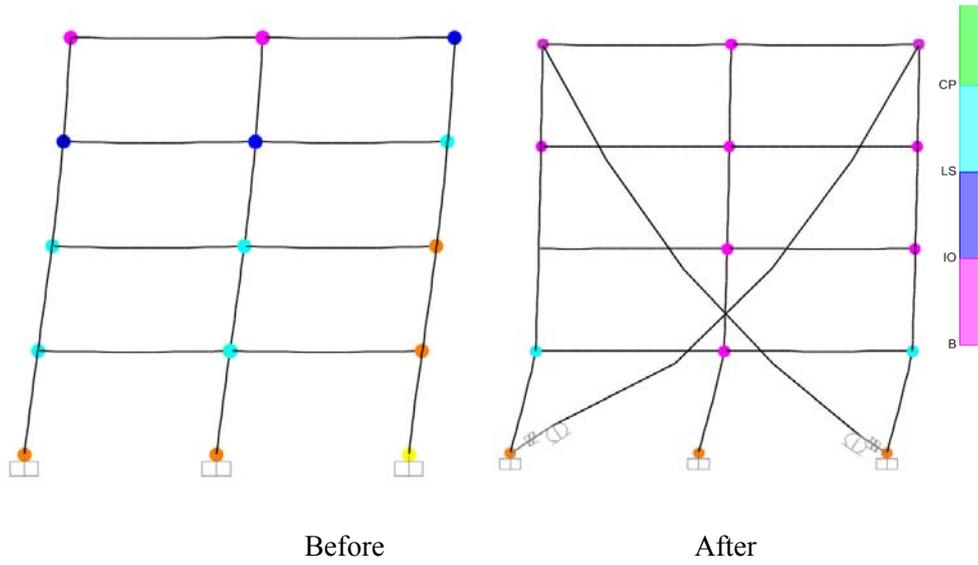
Fig. 4 DCS 시스템이 설치된 RC 골조 해석모델

- Pushover curve



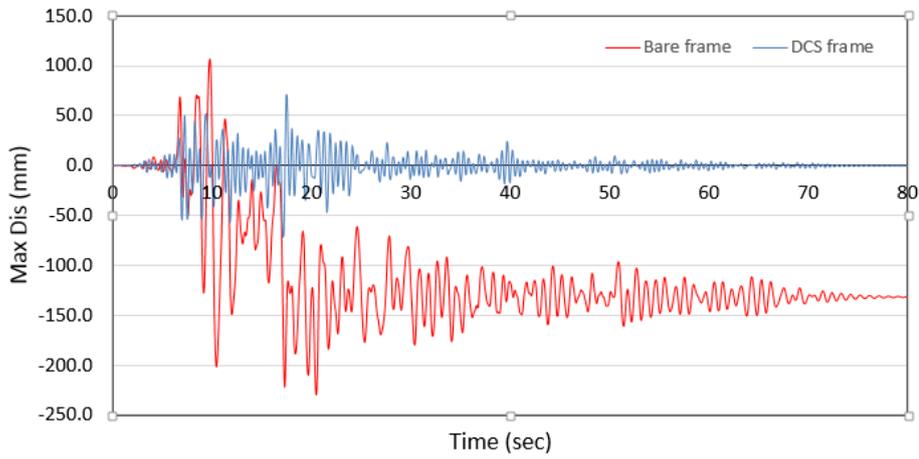
- DCS system 설치 후 해석모델의 강성 및 강도가 두 배 이상 증가함.

- Plastic hinge at ultimate strength

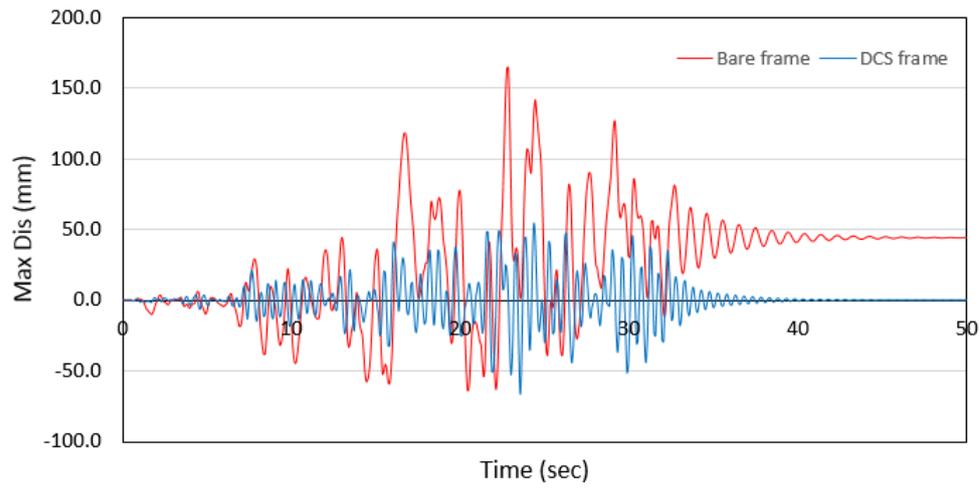


- DCS 설치 후 최대강도에서 소성힌지의 회전량이 전반적으로 감소함

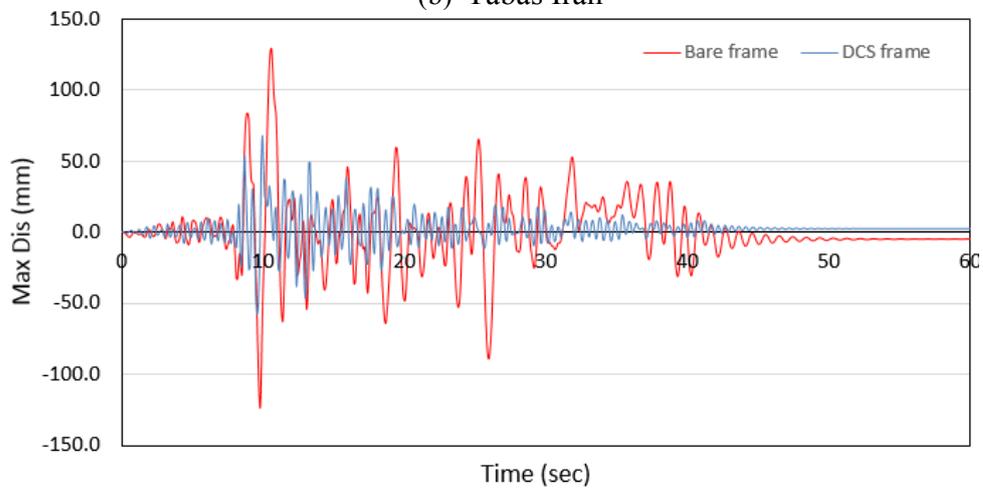
● 시간이력 해석결과



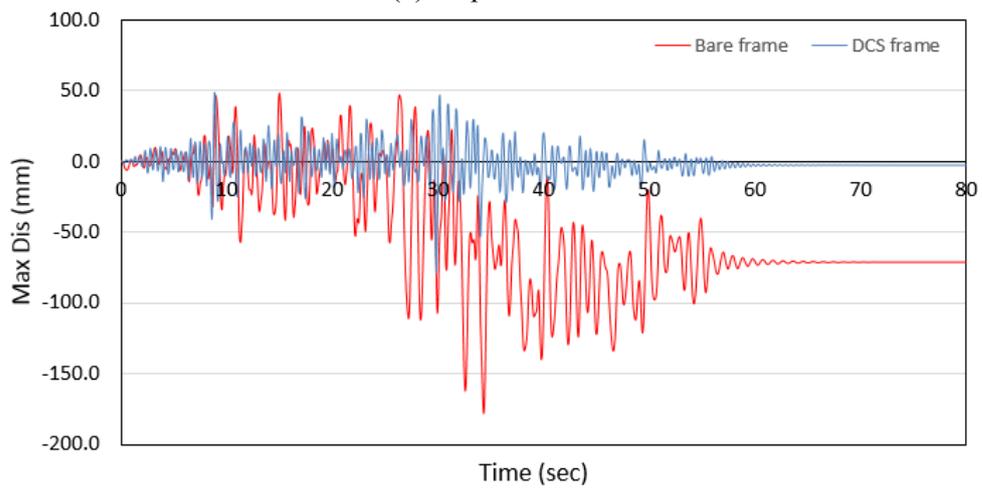
(a) Kern County earthquake



(b) Tabas Iran



(c) Cape Mendocino



(d) Landers earthquake

- 시간이력 해석결과 최대응답의 비교

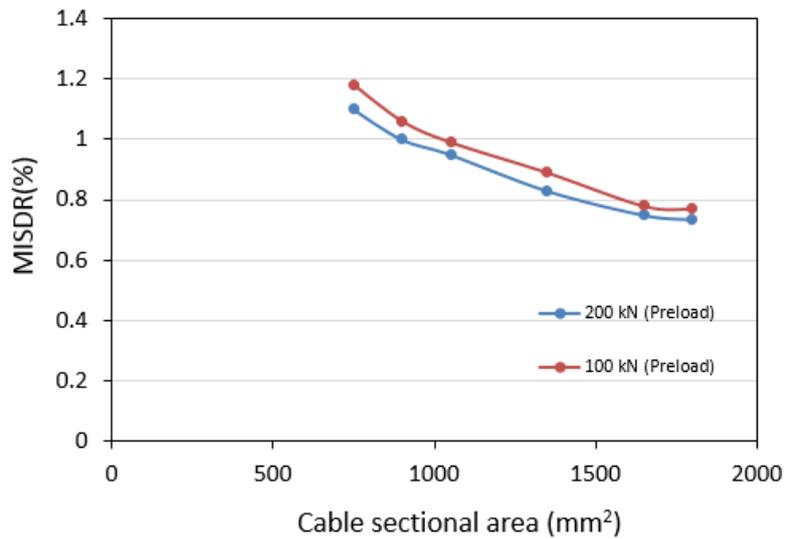
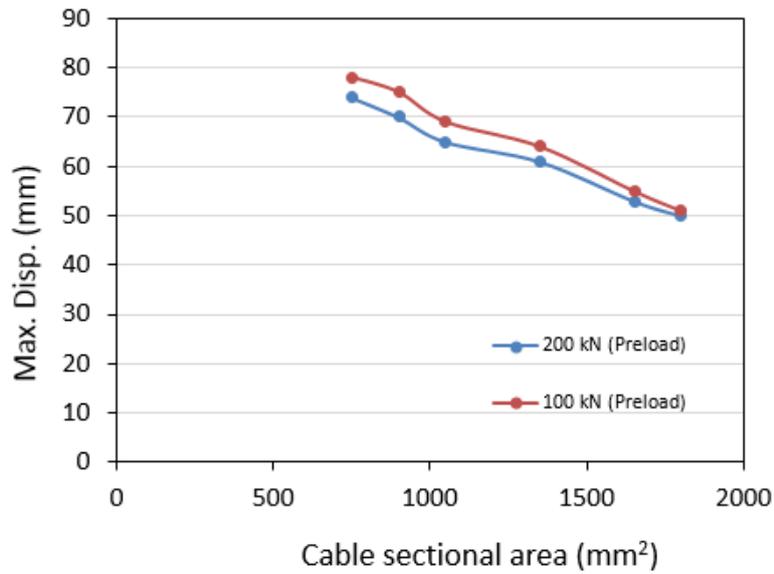
Bare Frame model			
Earthquake records	Max. Disp. (mm)	Residual Disp. (mm)	MISDR (%)
Kern County	229.4	131	2.12
Tabas	164.2	43	1.70
Cape Mendocino	129	8	1.52
Landers	178	70	1.77

Damped Cable System Frame			
Earthquake records	Max. Disp. (mm)	Residual Disp. (mm)	MISDR (%)
Kern County	70.0	0	1.0
Tabas	66.4	0	0.81
Cape Mendocino	57.7	1	0.86
Landers	78.0	0	0.94

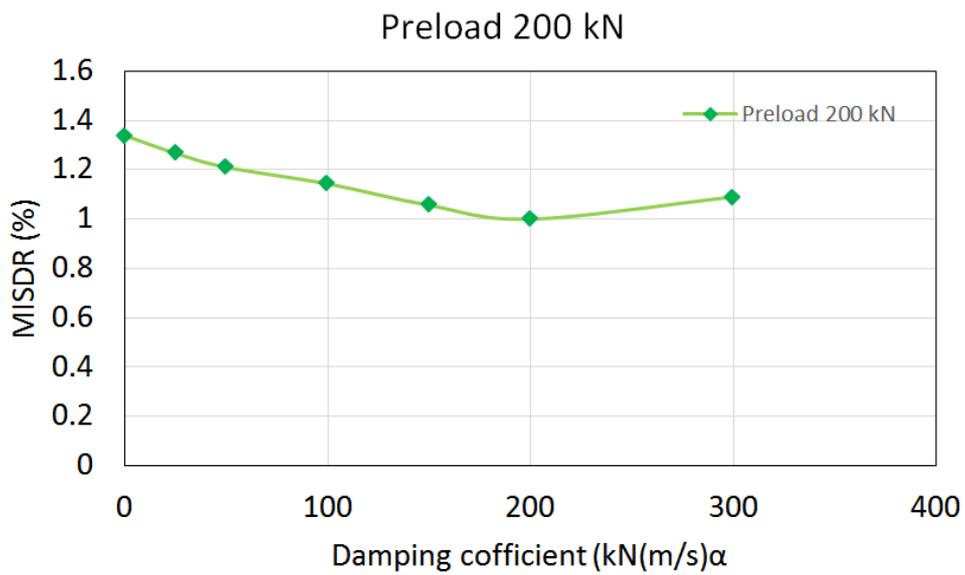
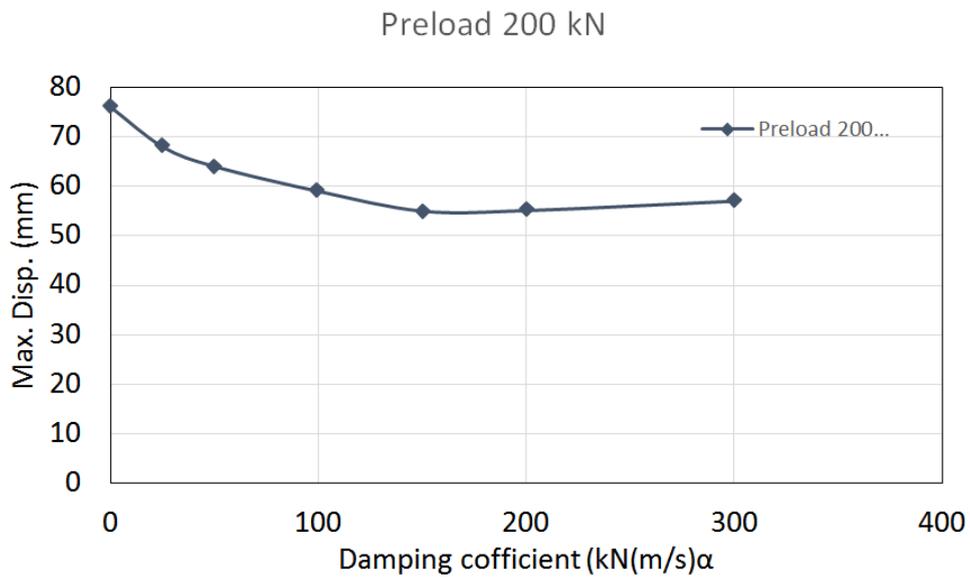
- DCS를 설치한 후 최대변위 및 최대 층간 변위 (MISDR)가 감소하였으며, 구조부재의 소성변형에 의한 잔류변위 (residual displacement)가 대폭 감소함

-

- Parametric study
- Area of cables
- Pretension
- Damping coefficient = $200 \text{ kN(m/s)}^{\alpha}$ (constant)



- Area of cables 1050 mm^2 (Constant)
- Pretension (variable)
- Damping coefficient (variable)

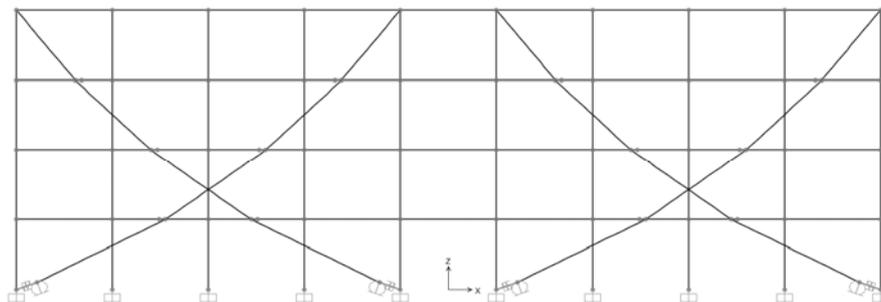
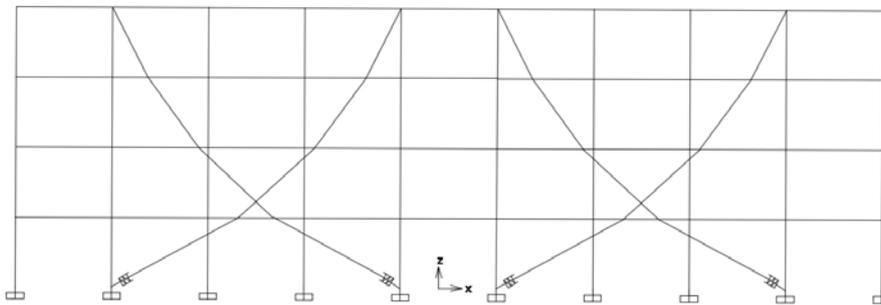
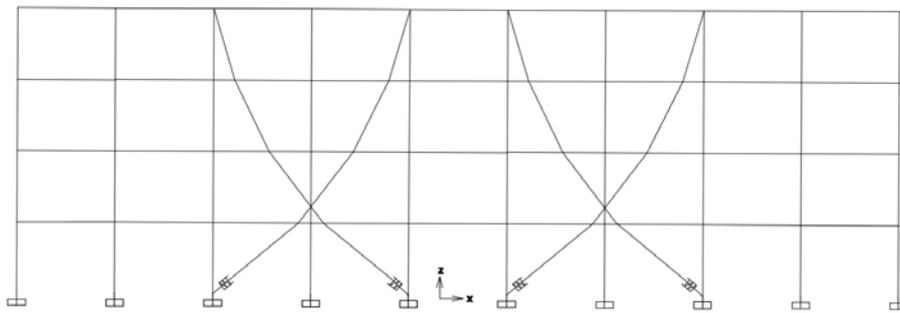


- 강선의 단면적이 증가할수록 강성이 커져 최대변위 및 최대 층간변위 (MISDR)가 감소함
- Viscous damper의 감쇠상수가 증가할수록 최대변위와 /층간 변위가 감소하다가 다시 증가하므로, 적절한 용량의 댐퍼를 적용할 필요가 있음.

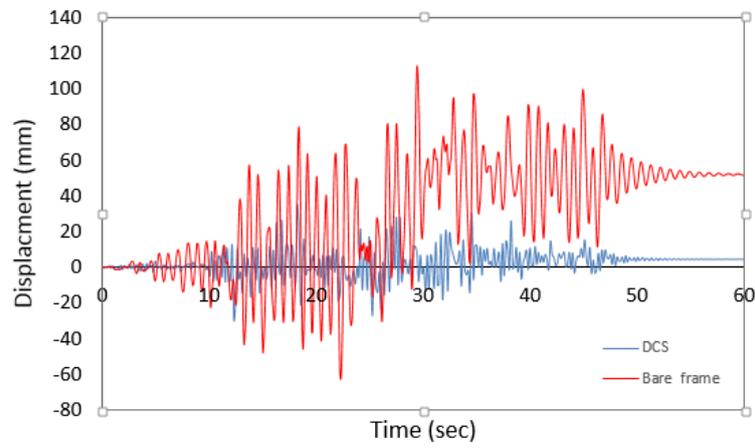
2.5 설치 경간 수의 영향

케이블 설치 경간 수의 영향을 검토하기 위하여 9경간 2D 모델을 설계하고 다음과 같은 설계변수를 적용하여 세 개 지진에 대한 변위 응답을 비교함

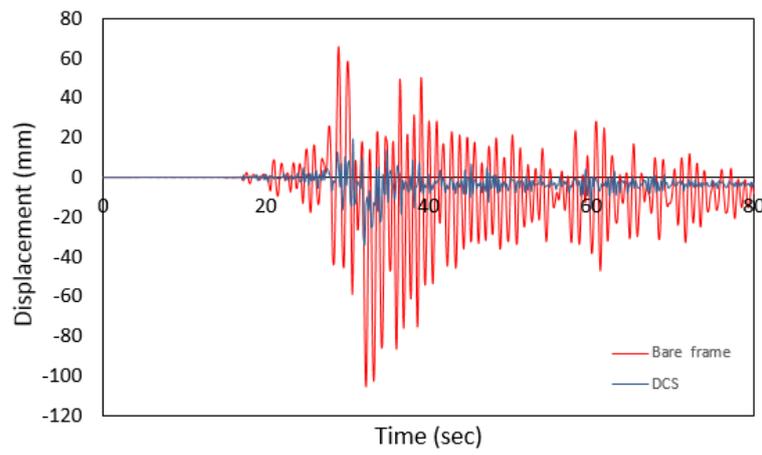
- Two sets of cables attached to two, three, and four bays of the structure
- Area of cable = 1800mm^2
- Damping coefficient = $200\text{kN(m/s)}^{\alpha}$
- Preload = 250kN



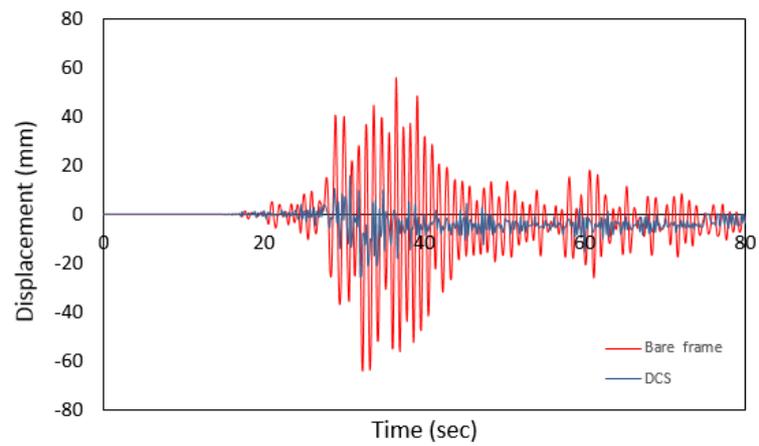
다음 그림은 4경간 설치모델의 최대변위의 시간이력을 나타냄.



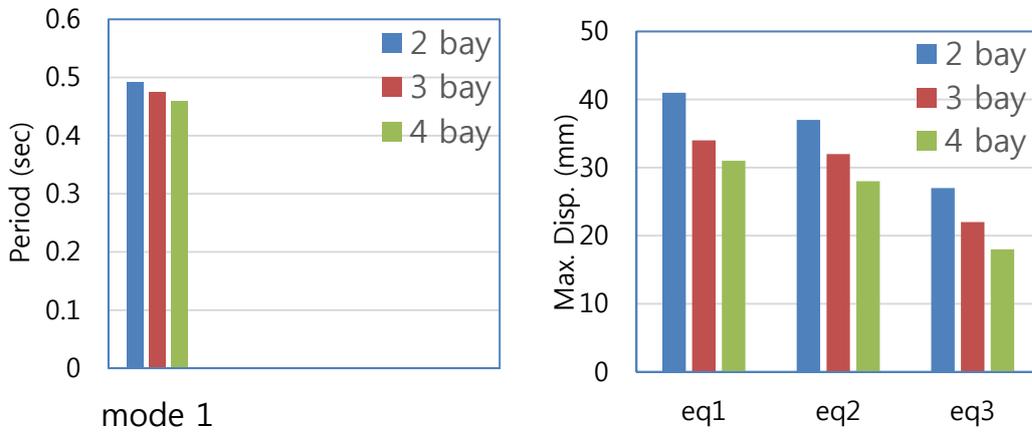
Landers EQ



Atakoy EQ.

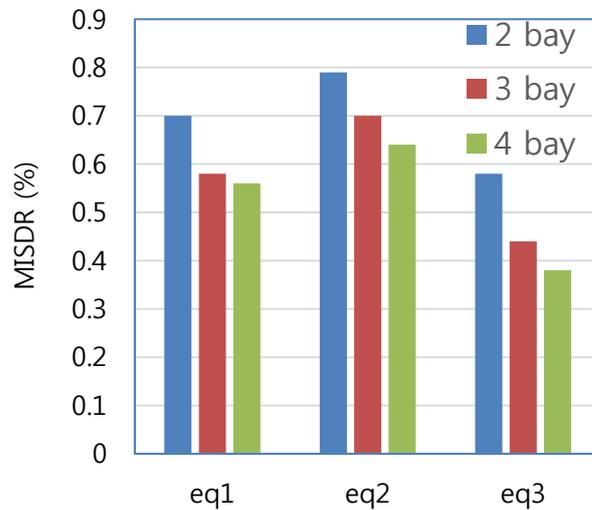


Brsa Tofas EQ.



1차 고유주기

세 개의 지진에 대한 최대 변위

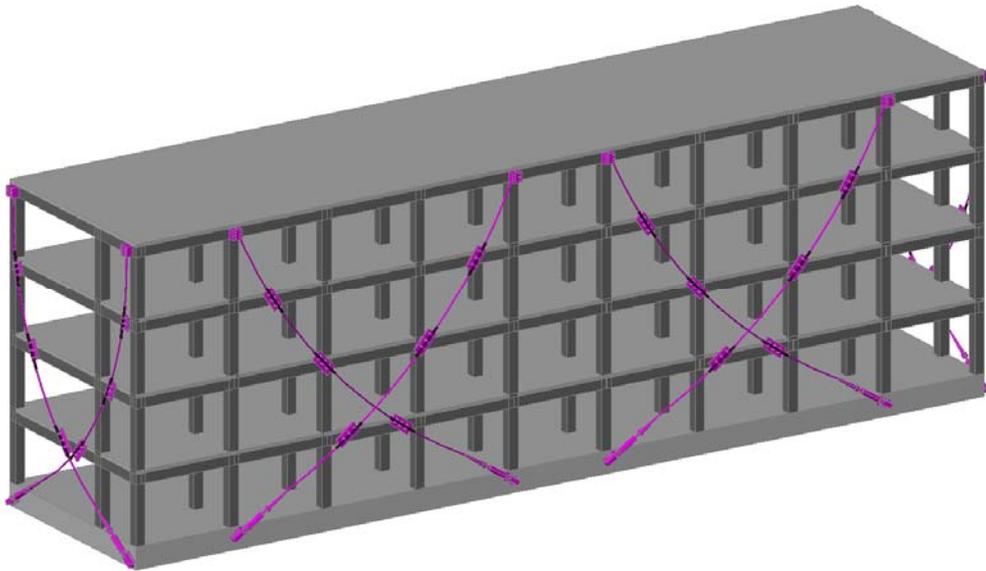
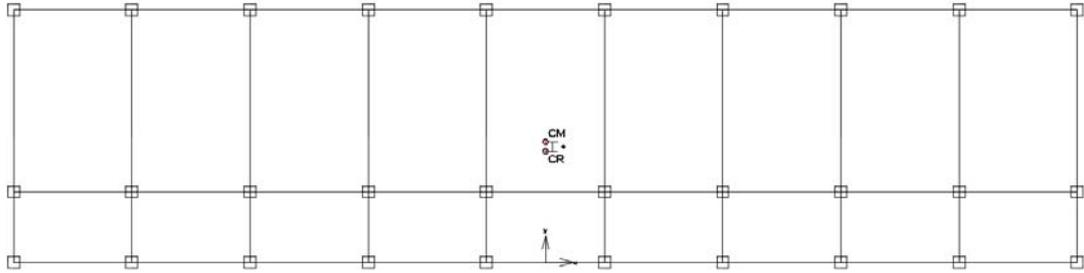


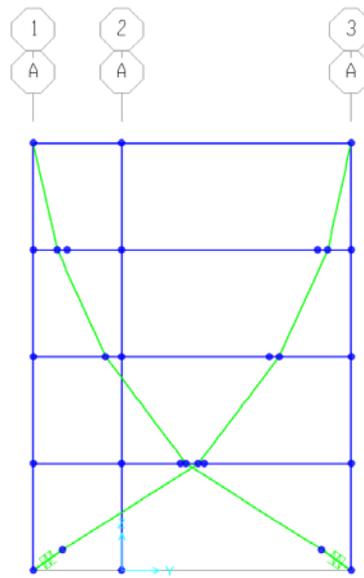
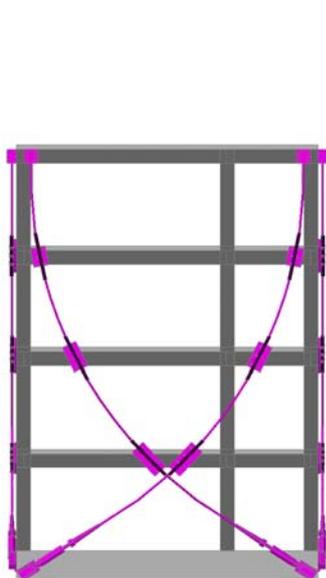
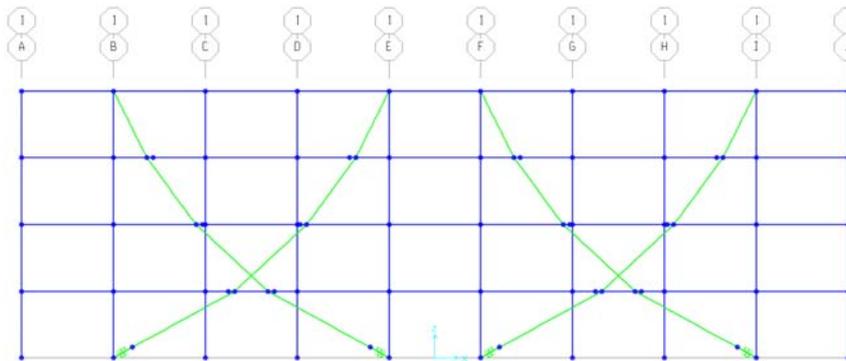
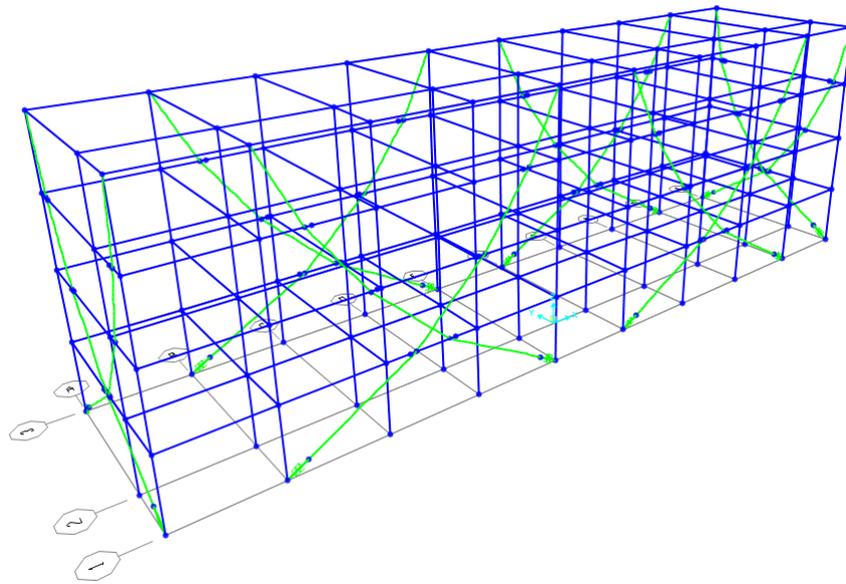
최대 층간변위

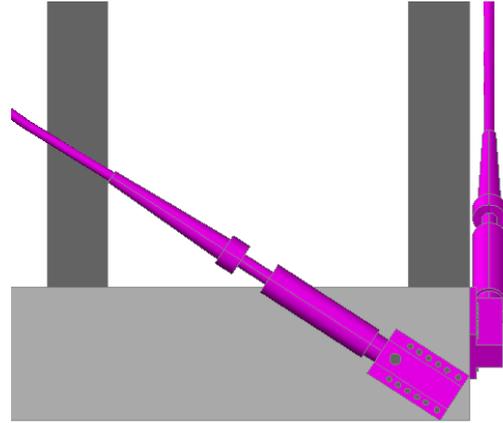
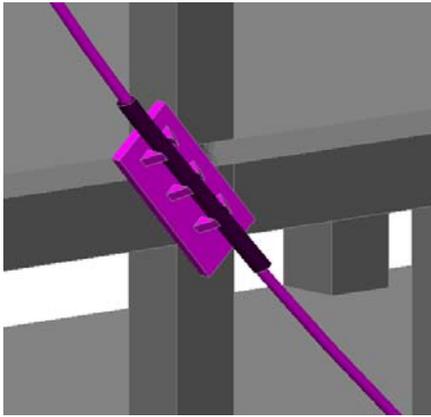
- 케이블을 세 경간, 네 경간에 걸쳐 설치한 경우 케이블에 좀 더 큰 축력이 발생하여 강성 증가 및 댐퍼의 효율이 높아지므로 주기가 더욱 짧아지고 지진 응답이 작게 나타남.

2.6 3D structure 해석결과

다음 그림은 4층 9경간 적용 건물의 구조평면 및 입면 형상을 나타냄.







3D model 장변과 단변에 PSC 시스템을 설치하고 내진보강 수행. 1열은 강성이 큰 stiff side, 3열은 강성이 작은 flexible side에 해당하므로, 각 열에 대한 2차원 pushover 해석을 수행하여 각 골조에 대한 강성을 구하고, 이를 근거로 eccentricity를 구함.

해석결과 eccentricity는 3.5%이며 강성중심과 질량중심의 간격은 150 mm로 나타남. 이를 바탕으로 장변방향으로는 PSC 시스템이 다음과 같이 설치됨:

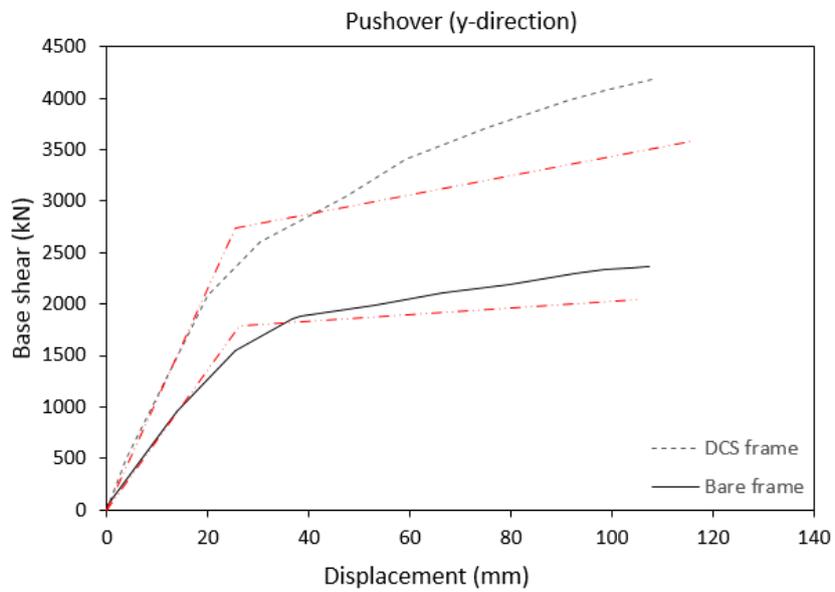
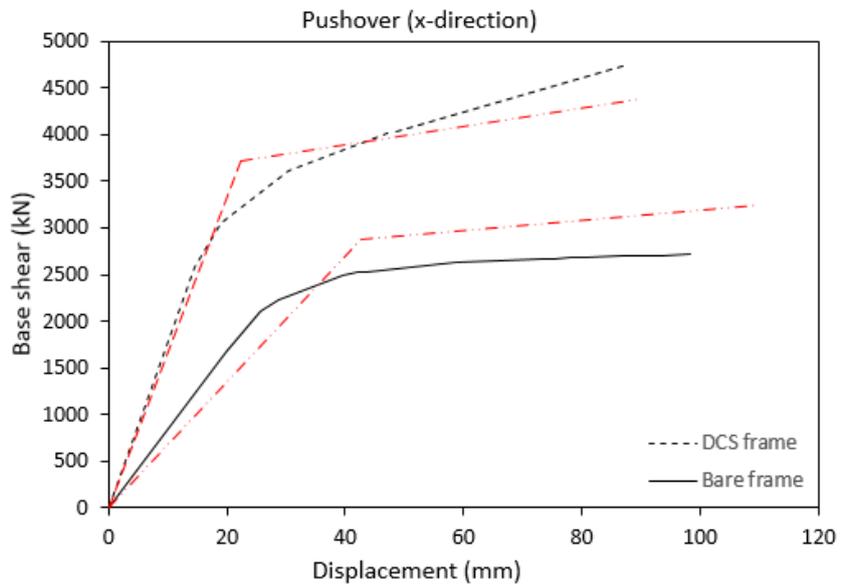
- Two sets of cables attached to three bays of the structure
- Area of cable = 2100mm^2 (stiffness side), 2300mm^2 (flexible side)
- Damping coefficient = $200\text{kN(m/s)}\alpha$
- Preload = 400kN

단변방향으로는:

$$\text{Area of cable} = 2400\text{mm}^2$$

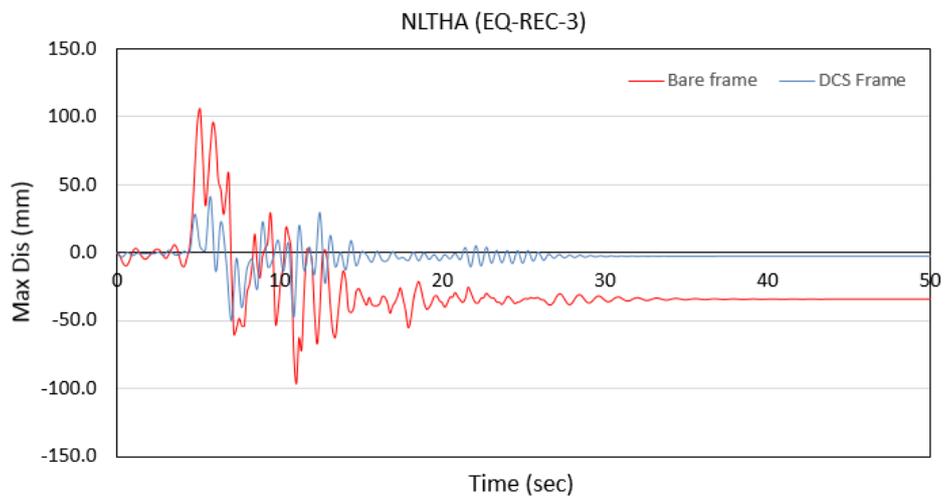
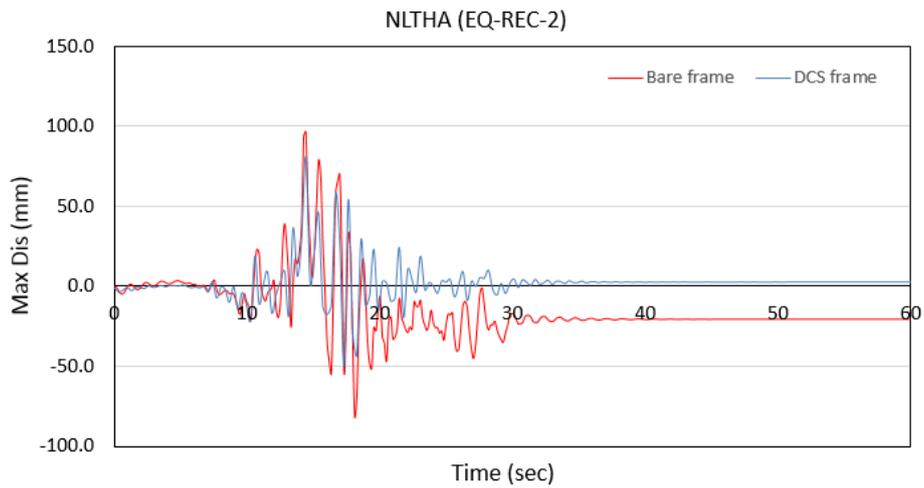
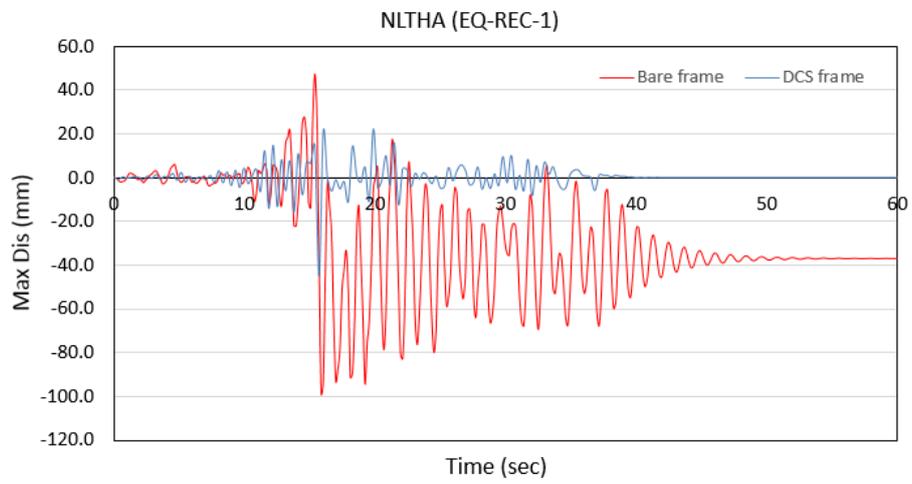
- Damping coefficient = $200\text{kN(m/s)}\alpha$
- Preload = 400kN

다음 그림은 보강 전후 장변 (x 방향) 및 단변방향의 pushover 해석결과임

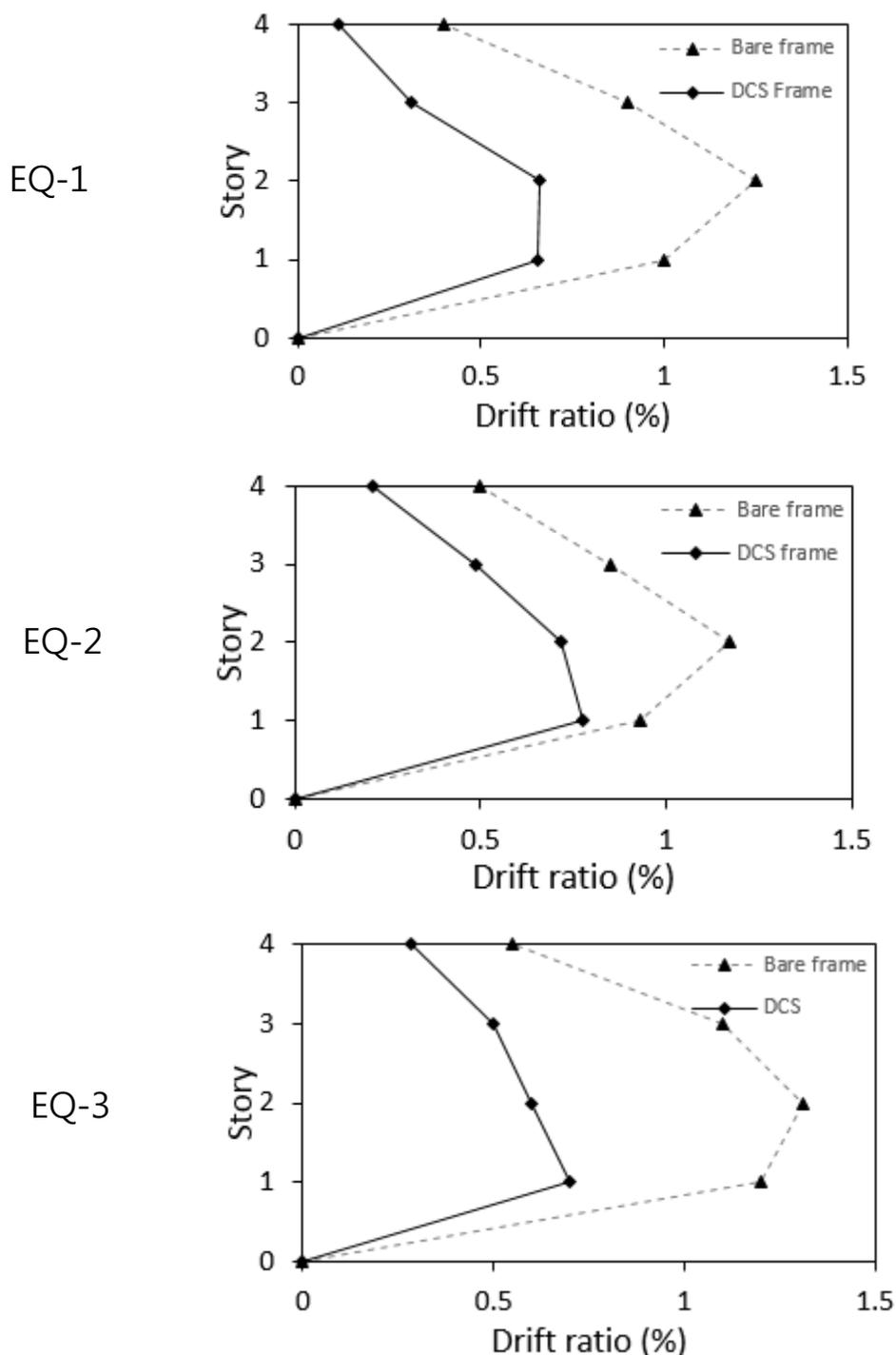


해석결과에 따르면 보강 후 강성 및 강도가 크게 증가하는 것으로 나타남.

세 개의 인공지진을 이용한 최대변위의 시간이력 해석결과는 다음과 같음



시간이력 해석결과 보강 전 구조물의 최대변위는 100 mm 이상 발생하였으며 잔류변위 또한 20 mm 이상 발생하였다. 보강 후 최대 변위는 50 mm 이하로 감소하였으며, 잔류변위는 거의 발생하지 않음



앞의 그림은 시간이력 해석에 의한 최대 층간 변위를 나타낸 것으로, 보강 전 최대 층간 변위는 층고의 약 1.3% 발생하였으며, 보강 후 층간변위는 약 0.7 %로 감소함

2.7 소 결

- 비내진구조물의 내진보강을 위하여 PCS 설치 후 구조물의 강성 및 강도가 증가하고, 최대변위, 최대층간변위, 잔류변위 등 변위 응답이 감소하며, 기준에서 요구하는 성능수준을 만족하는 것으로 나타남.
- 변위응답은 케이블의 단면적, 초기 장력, 댐퍼의 감쇠계수에 비례하여 감소하는 것으로 나타남.
- 케이블의 설치 각도는 두 경간에 걸쳐 설치된 경우 보다 세 경간 및 네 경간에 좀 더 완만한 각도로 설치한 경우에 응답 저감 효과가 큰 것으로 나타남. 하지만 케이블이 설치되는 경간의 수가 증가할수록 케이블의 길이가 길어지므로 비용이 증가함.