

붕괴모드 컨트롤형 철골조 시스템의 온라인 지진응답실험

On-line Tests on Collapse Mode Controlled Steel Frame

이 승 재*
Lee, Seung-Jae

오 상 훈**
Oh, Sang-Hoon

요 약

본 연구는 강진 시 소성화 범위를 최소화하여 장수명 철골구조를 실현하는 구조시스템을 제안하고, 지진응답특성을 실증적으로 파악하는 것을 연구목적으로 한다. 이를 위하여, 실험용 1층 철골조 실험체 2개를 설계 및 제작하여 가동적 지진응답실험을 수행하였다. 실험결과에 의하면 본 연구에서 제안한 철골구조시스템은 이력형 강재댐퍼, 보-기둥접합부 순서로 붕괴모드가 발생하였으며, 지진응답시간 중 그 외의 주변 프레임은 탄성 상태에 머무르는 것을 확인하였다.

Abstract

In this study, it is demonstrated by a pseudo dynamic earthquake response tests that combination of semi-rigid partial-strength using the high performance-high strength bolts and inter-story hysteretic damper system creates a fairly good structural system that satisfies not only the serviceability requirement under moderate earthquakes but unexpected failure of damper system.

키워드 : 이력댐퍼, 지진응답특성, 가동적 지진응답실험

Keywords : Hysteretic damper, Earthquake response characteristic, Pseudo dynamic earthquake test

1. 서 론

다양한 제진디바이스를 장착한 철골조 건축물이 근년 증가하고 있다. 신규 건축물뿐만 아니라 기존 건축물의 내진보강 및 지진응답 저감의 목적으로 도입되는 추세에 있다. 이와 같은 제진디바이스 중에서 강재의 이력감쇠 성능을 이용한 이력형 강재댐퍼가 최근 주목을 받고 있다^{1), 2)}. 이력형 강재댐퍼를 사용하는 경우, 주체구조에 비해 높은 강성의 강재댐퍼를 이용함으로써 소폭의 변위에 강재댐퍼가 소성화 함으로써 이력에 의한 지진에너지를 흡수하는 것을 목적으로 하고 있다.

본 연구는 강진 시 소성화 범위를 최소화하여 장수명 철골구조를 실현하는 구조시스템을 제안하고,

지진응답특성을 실증적으로 파악하는 것을 연구목적으로 한다.

본 연구에서 제안하는 구조시스템은, 고변형성능 고력볼트를 사용한 보-기둥 접합부, 주각부 그리고 사잇기둥 형식의 이력형 강재댐퍼로 구성된 철골구조 시스템이다. 중소규모 지진 시 이력형 강재댐퍼가 지진에너지를 흡수하여 사용성을 확보하고, 강진 시에는 고변형성능 고력볼트로 구성된 보-기둥 접합부가 지진에너지를 흡수하고, 최종적으로 예기치 못한 규모의 대규모 지진에는 고변형성능 고력볼트를 사용한 주각부의 소성변형을 이용한 지진에너지 흡수로 구조물의 붕괴를 방지하는 붕괴모드 컨트롤이 가능한 철골구조 시스템이다.

본 연구에서 제안한 실험체형의 1층 철골조 구조물을 대상으로 가동적 지진응답실험을 수행하고, 그 결과를 브레이스를 내진요소로 사용한 일반형 철골조 구조물과 비교하여 동적특성을 검증하였다.

* 정희원 · 한국기술교육대학교 건축공학부 교수, 공학박사
Tel: 041-560-1334 Fax:041-560-1224
E-mail : leeseung@kut.ac.kr

** 정희원 · 부산대학교 건축공학부 교수, 공학박사

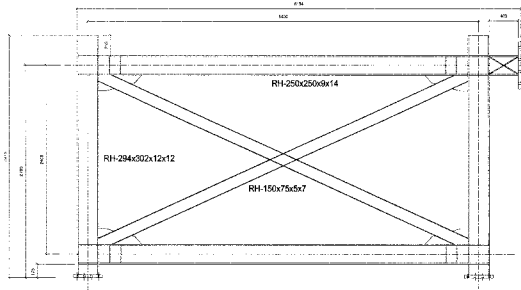
2. 가동적 지진응답실험의 계획

2.1 실험계획

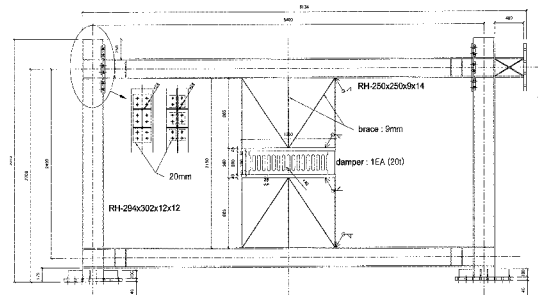
본 연구에서 제안하는 붕괴모드 컨트롤형 철골조 구조물과 일반형 브레이스가 장착된 철골조 구조물을 <그림 1>에 나타낸다. 양 구조물에 사용된 강재는, 보 SM490급 강재 RH-250×250×9×14와 기둥은 동급의 RH-294×302×12×12 강재를 사용하였으며, 보와 기둥의 소성내력비는 1.33으로서 강주약보의 철골 골조 구조물이다. 이력형 강재댐퍼를 장착하기 위하여, 사잇기둥을 골조의 상단 및 하단보의 플랜지에 용접 접합하여 댐퍼를 장착하였다. 댐퍼부재는 SS400급의 강재를 사용하였다. 소성변형을 댐퍼에 집중시키기 위하여 사잇기둥의 강판에 V형 브레이스를 설치하였다. 또한 보-기둥 접합부는 보단부에 엔드플레이트를 용접 접합하여 선행연구3)에서 제안하였던 F10T-M19.5 고변형성능 고력볼트를 사용하여 접합하고, 기둥 플랜지의 과다변형을 방지하기 위하여 보강용 플레이트를 사용하였다. 그리고 브레이스

부재로서는 SS400급 강재 L-150×75×5×7을 사용하였다.

철골 골조 보단부에 가력점을 형성하기 위하여 강재 플레이트를 설치하여 액츄에이터에 부착하여 가력을 수행하였다. 본 실험에서는 예기치 못한 극대 수평 하중만을 대상으로 기둥 및 보의 변동축력은 고려하지 않았다. 액츄에이터 작용점과 수평되는 반대방향 보단부에 외부변위계를 설치하였다. 이것은 예비실험 결과, 외부변위계의 변위량과 액츄에이터 스트로커 변위량의 차이는 1/10mm 정도의 오차가 발생하였다. 이것은 액츄에이터와 가력점 사이의 12점 볼트접합으로 인한 가력점의 분산으로 인하여 발생하는 것으로 사료된다. 계측계획으로서는 각 시험체의 보와 기둥의 소성과 여부를 판단하기 위하여 주식회사 교와제작의 전기저항식 KFEL 소성게이지를 사용하였다. 또한 보와 기둥의 플랜지 및 웨브부분 이외에도 강재댐퍼, 사잇기둥, 고변형성능 고력볼트, 주각부의 엔드플레이트 등에도 소성용 전기저항식 스트레인계

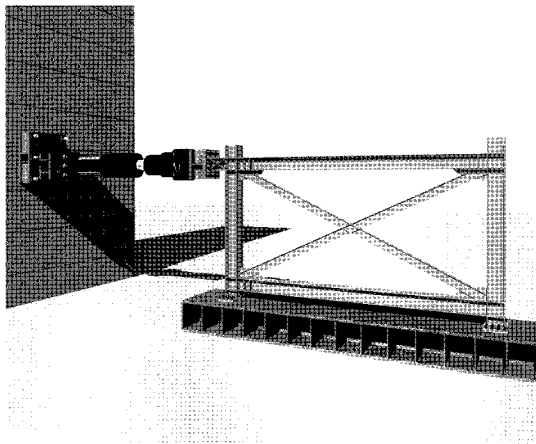


(a) 일반 브레이스가 장착된 철골구조물

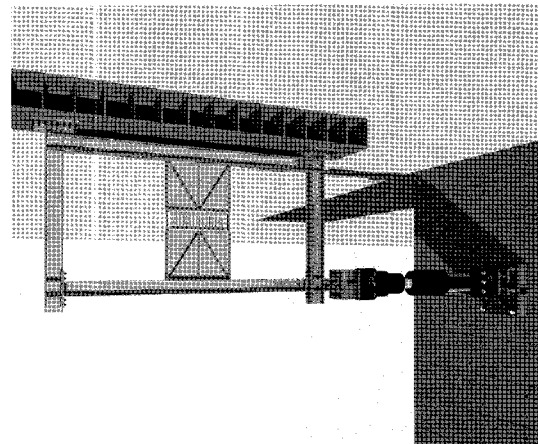


(b) 붕괴모드 컨트롤형 철골구조물

<그림 1> 일반 브레이스가 장착된 철골구조물(좌)과 붕괴모드 컨트롤형 철골구조물(우)



(a) Details of SRCB



(b) Details of SRSD

<그림 2> 실험체 셋업 개념도

이치를 설치하여 변형량을 계측하였다. 실험체 셋업 개념도를 <그림 2>에 나타낸다.

2.2 소재인장시험

실험체 제작에 사용된 강재의 기계적 성질을 시험하기 위하여 부재별로 각각 5개씩의 시편을 제작하였다. KS B 0801의 인장 시험 규준에 따라 실시한 인장 시험 결과를 <표 1>에 나타낸다.

<표 1> 인장강도시험 결과 (평균값)

	σ_y (N/mm ²)	σ_t (N/mm ²)	σ_y/σ_t (%)	연신율 (%)
Beam-flange	348	522	67	19
Beam-web	353	538	66	18
Column-flange	377	527	72	21
Column-web	385	542	71	20
Brace-flange	269	406	66	30
Brace-web	278	420	66	28
Damper	302	439	69	28

2.3 가동적 지진응답실험 시스템

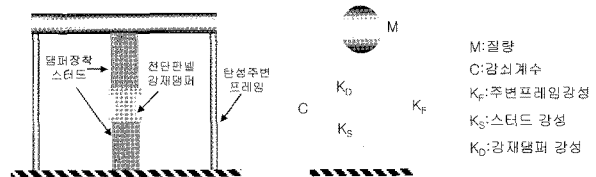
그동안 구조물의 거동을 파악하기 위하여 개별적으로 실시되어왔던 재하실험과 탄소성 지진응답해석을 온라인으로 연결하여 실험과 해석을 동시에 진행시키는 수법을 가동적 지진응답실험이라고 한다.

구조성능 실험대상인 다자유도계 구조물에 대하여 구조물이 가지는 관성력, 감쇠력을 컴퓨터 내에서 시뮬레이션하고, 구조물의 복원력 특성을 재하실험으로부터 추출하여 전체의 구조시스템을 지배하는 운동방정식을 시간 적분하여 해석을 수행한다. 컴퓨터의 수치해석결과를 데이터 전송기술을 이용하여 재하 장치에 보내고, 재하결과 얻어진 실험데이터를 다시 컴퓨터에 전송하여 전 지진 입력 시간에 대하여 반복한다.

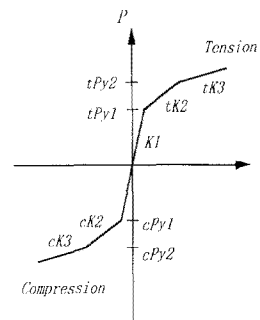
2.4 예비지진응답 해석

성능평가를 위한 가동적 지진응답실험에 앞서 복원력 특성 모델을 상정하여 탄소성 지진응답해석을 수행하였다. 가동적 지진응답실험을 수행하기 위하여 양 구조물의 탄성주기를 1.0초로 하여 가상질량을 정하였다. 또한 감쇠정수는 실험의 안정성을 위하여 0.005%로 설정하였다. 사용한 지진파는 El Centro

NS 1940 성분의 PGA를 1000gal로 설정하여 지속 시간 10초로 입력하였다. 이력형 강재댐퍼가 장착된 철골 구조물의 진동모델을 <그림 3>에 나타낸다. 수치적분법은 중앙차분법, 적분간격은 0.01초를 사용하였다.



<그림 3> 이력형 강재댐퍼가 장착된 구조물의 진동모델

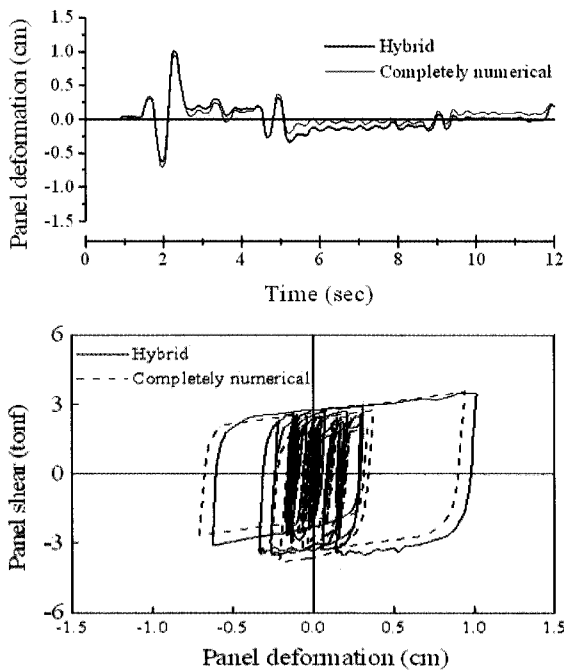


<그림 4> 스키톤시프트 모델의 복원력 특성

또한 가동적 지진응답실험 결과와 비교하기 위하여 사용한 댐퍼 및 브레이스 부분의 복원력특성 모델은, 스키톤시프트형 복원력 특성모델(1)을 사용한다. 동 모델은 <그림 4>에 나타내는 것과 같이 해석 전에 미리 로딩부분과 언로딩 부분을 독립적으로 설정한 스키톤을 각각의 역방향의 스키톤 상에서 과거에 경험한 소성변형에 비례하여 스키톤을 시프트시키는 모델이다. 스키톤으로부터 언로딩하여 반대측의 스키톤에 도달하기까지의 연화부분은 램버그오스굿(Ramberg-Osgood)모델의 연속함수식을 이용한다. 본 해석에 있어서 스키톤의 소성변형 비례량 ψ 는 0.3을 이용하였고, 램버그오스굿 함수식의 곡선지수는 r 은 8을 이용하였다. 스키톤시프트 모델의 응답 해석 결과를 이전 데이터와 비교한 내용을 <그림 5>에 나타낸다.

2.5 실험결과 및 고찰

일반 브레이스가 장착된 철골구조물과 붕괴모드 컨트롤형 철골구조물 각 실험체의 강성과 강도의 크



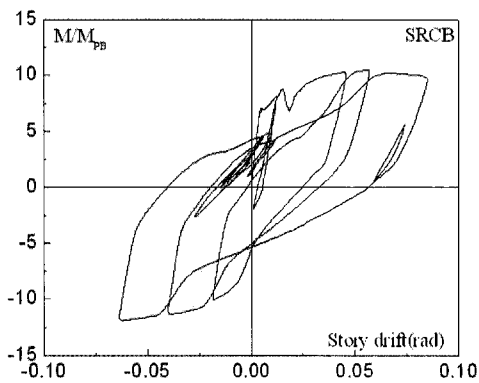
〈그림 5〉 스켈톤시프트 모델의 응답해석결과 비교

기를 〈표 2〉에 나타낸다.

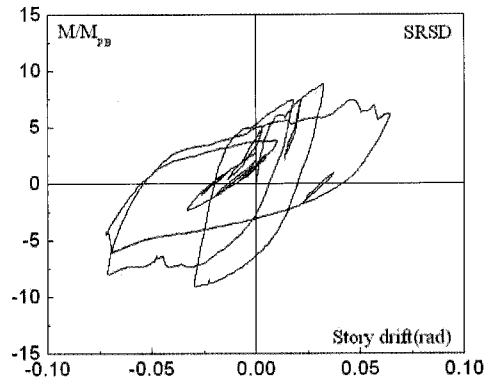
〈표 2〉 SRCB와 SRSD의 강도와 강성

	Initial stiffness	Strength
Frame of SRCB	1.0	1.0(at Mp)
Brace of SRCB	2.5	2.0
Frame of SRSD	2.5	1.0
Damper of SRSD	2.0	0.4
Joint of SRSD	0.6	0.6 to > 0.8 at max

가동적 지진응답실험 결과를 〈그림 6〉, 스켈톤시프트 모델을 이용한 지진응답 해석결과를 〈그림 7〉에 나타낸다. 또한 스트레인게이지의 시간이력 응답을 〈그림 8〉에 나타낸다.

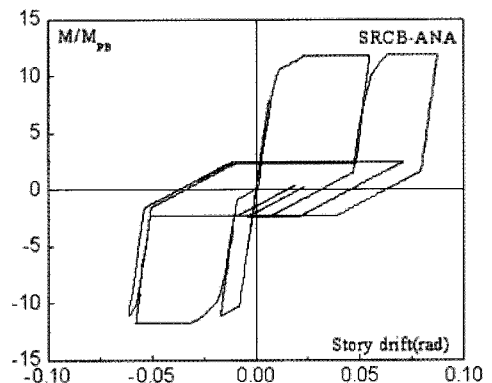


(a) 일반 브레이스가 장착된 철골구조물

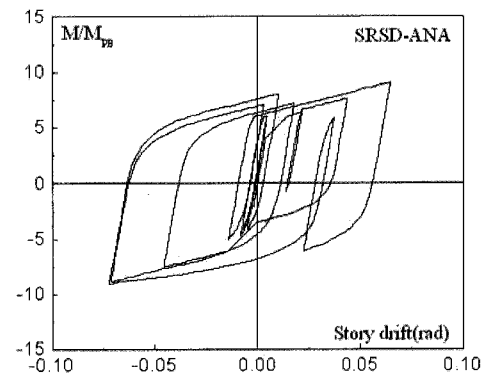


(b) 붕괴모드 컨트롤형 철골구조물

〈그림 6〉 가동적 지진응답실험 결과



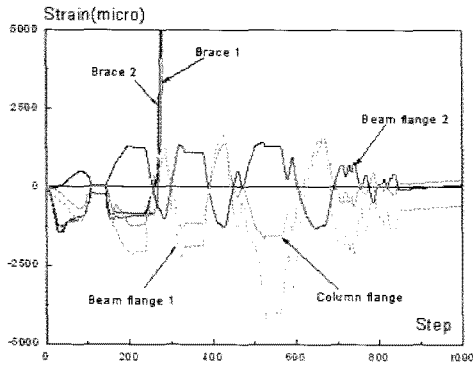
(a) 일반 브레이스가 장착된 철골구조물



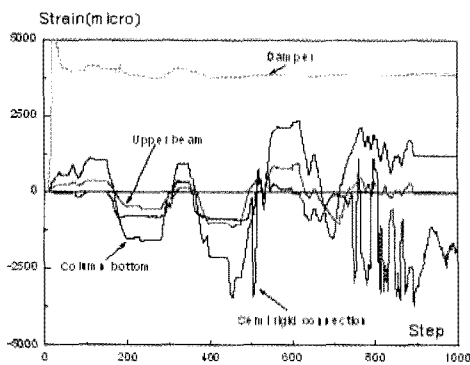
(b) 붕괴모드 컨트롤형 철골구조물

〈그림 7〉 탄소성 지진응답해석 결과

붕괴모드 컨트롤형 철골 구조물의 지진응답은, 지진입력 초기에 댐퍼가 항복하고 그 후 안정된 소성이력 특성을 나타낸다. El Centro 지진파의 PGA를 경험한 후 댐퍼는 휨 항복에서 인장항복 상태로 전이하여 7초(700스텝) 부근에서 인장파단이 발생하였다. 한편 보-기둥 접합부의 고변형성능 고력볼트는 4초 부근에서 초기 항복하여 4000마이크로 정도의 응답량을 나타내고 있다. 손상순서는 댐퍼의 소성변형, 고



(a) 일반 브레이스가 장착된 철골구조물



(b) 붕괴모드 컨트롤형 철골구조물

(그림 8) 스트레인게이지의 변형 시간이력 응답

변형성능 패스너의 소성변형(15%), 그리고 보 단부의 엔드플레이트의 항복으로 이어졌으며, 중간변형각 1/20라디안의 응답까지 기둥의 국부좌굴은 발생하지 않았으며, 약간의 슬립현상을 동반한 지진응답을 나타내었다. 또한 주각부는 탄성 상태에 머물렀다.

브레이스를 장착한 철골 구조물은 압축 측 브레이스가 좌굴 후 다시 원상태로 돌아오기까지 초기강성의 1/10정도의 낮은 슬립강성을 나타내고 있으며, 다시 인장재가 항복을 경험할 때까지 큰 변위응답을 나타내고 있다. 붕괴모드 컨트롤형 철골구조물과의 변위응답을 비교하면, 브레이스의 인장내력이 크에도 불구하고 변위응답이 더 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 이것은 브레이스의 슬립현상이 변위응답에 미치는 영향으로 해석할 수 있다. 스트레인게이지의 변형량에 의하면 가새부분은 큰 소성변형응답을 나타내고 있으며 그 외 부분은 탄성상태에 머무르고 있다. 또한 지진입력 후 5초 부근에서 브레이스에 심각한 면외좌굴이 발생하여 외장재의 탈락 등의 손상이 우

려되었다. 본 실험체에서는 기둥하단 플랜지의 국부좌굴을 방지하기 위하여 주각부를 핀접합으로 구성하였음에도 불구하고 기둥주각부에 심한 국부좌굴이 관찰되었다. 실험 후의 사진을 <사진 1>에 나타낸다. <사진 1>의 (a)는 SRCB의 실험 종료 후 브레이스의 면외좌굴을 나타내고 있으며, (b)는 기둥 플랜지 부분의 국부좌굴을 나타내고 있다. 또한, (c)는 댐퍼 파단 후 보-기둥 접합부의 소성화를 나타내고 있으며, (d)는 지진파 입력 후 초기에 발생한 댐퍼의 파단을 나타내고 있다.

실험결과와 해석결과를 비교하면, 양쪽 모두 최대 변위응답은 충분히 예측하고 있으나, 댐퍼 및 브레이스의 소성항복 및 좌굴 이후의 거동 추적에는 도달하지 못하고 있다. 이것은 전술의 댐퍼의 항복 메카니즘의 힘 항복에서 인장파괴로의 전이현상과 브레이스의 좌굴 후 안정내력의 추정에 있다고 할 수 있으나 전체적인 거동은 추적가능하다고 판단된다.

3. 결론

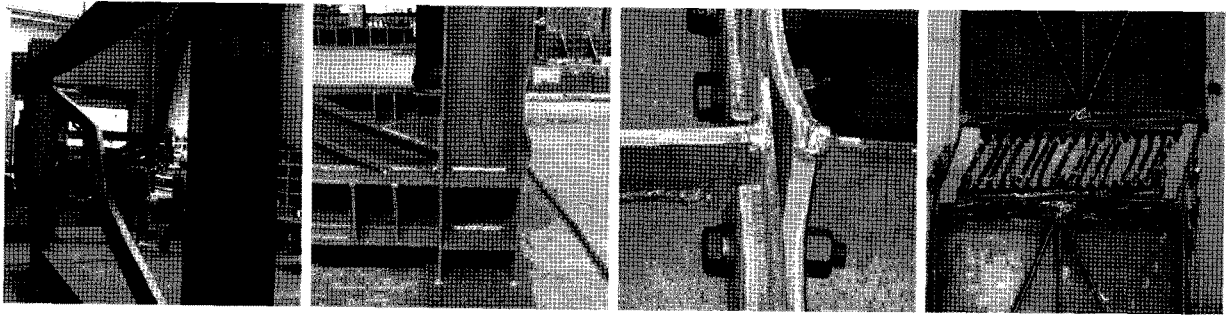
본 연구에서는 손상순서를 제어함으로써 붕괴모드를 컨트롤할 수 있는 철골구조 시스템을 제안하고, 강진시의 동적응답특성을 가동적 지진응답실험에 의하여 검증하였다. 실험결과에 의하면 본 연구에서 제안한 철골구조시스템은 이력형 강재댐퍼, 보-기둥접합부의 순서로 붕괴모드가 발생하였으며, 지진응답시간 중 그 외의 주변 프레임은 탄성 상태에 머무르는 것을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 첨단도시개발사업의 연구비지원(과제번호 # '06 R&D B03)에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) K. Ohi, S.J. Lee, A. Nishida, "Earthquake Response Behaviors of Steel Frames with Low-Yield-Point Steel



〈사진 1〉 실험 후의 전경

Dampers", Journal of Structural and Construction of Architecture Institute of Japan, No.538, Dec. 2000, pp.171-178

- 2) 유흥식, 김영주, 오상훈, 강창훈, 최홍배, "Fe-Mn 방진합금을 적용한 이력댐퍼에 관한 연구", 한국강구조학회 학술발표회 논문집, 제17권, 1호, 2006년 6월, pp.49-52
- 3) 김승구, 이승재, 오상훈, 강창훈, "고변형성능 고력볼트의 접합부 내진성능에 관한 연구", 한국강

구조학회 학술발표회 논문집, 제17권, 1호, 2006년 6월, pp.91-94

접수일자 : 2008년 12월 8일
심사완료일자 : 2009년 2월 27일
게재확정일자 : 2009년 3월 6일