



2009年 2月

碩士學位論文

이력댐퍼를 이용한 연결제진(連結制振) 구조물의 지진응답특성

朝鮮大學校大學院

建築工學科

金賢洙

이력댐퍼를 이용한 연결제진(連結制振) 구조물의 지진응답특성

Seismic Performance of Interaction Vibration Control System using Hysteresis Damper

2009年 2月 25日

朝鮮大學校大學院

建築工學科

金賢洙

이력댐퍼를 이용한 연결제진(連結制振)

구조물의 지진응답특성

指導教授 崔 宰 赫

이 論文을 工學 碩士學位申請 論文으로 提出함.

2008年 10月

朝鮮大學校大學院

建築工學科

金賢洙

金賢洙의 碩士學位論文을 認准함

委員	長	朝鮮大學校	教授	梁	永	晟	印
委	員	朝鮮大學校	教授	金	政	燮	印
委	員	朝鮮大學校	教授	崔	宰	赫	印

2008年 11月

朝鮮大學校大學院

ABSTRACT

기호, 용어

제1장 서론

1.1	연구의	배경	및 목적	1
1.2	기존의	연구		2

제2장 전단형마찰댐퍼(Shear type friction damper)의 특성과 준정적

(準靜的, Quasi-static) 재하실험

2.	1 전단형마찰댐퍼의 개요
2.2	2 재하실험계획
	2.2.1 실험체
	2.2.2 재하목표변위
	2.2.3 가력방법
2	2.2.4 측정방법
2.3	3 실험결과
	2.3.1 준정적 일방향 재하실험(Monotonic Loading Test)의 결과
	2.3.2 준정적 양방향 재하실험(Cyclic Loading Test)의 결과
	2.3.3 미끄럼계수의 변동 특성
	2.3.4 볼트 초기도입장력(導入張力)의 거동
	2.3.5 미끄럼면의 마모
	2.3.6 마찰음
2.4	4 마찰댐퍼의 복원력 특성 모델
	2.4.1 해석모델(완전탄소성모델)

- | -

2.4.2 해석결과	3+	1
------------	----	---

제3장 연결제진(連結制振)구조물의 지진 응답 해석

3.1	연결제진(連結制振)구조물의	지진	응답	해석	개요	 34
3.	1.1 운동방정식					 34
3.	1.2 시간이력 지진응답해석					 37
3.2	연결제진(連結制振)구조물의	해석	고델	•••••		 39

제4장 제진성능(制振性能)곡선

4.1 제진성능	곡선	42
4.2 해석결과		44

제5장 Sub-structure Online Test

부록	
참고문헌	101
제6장 결론	100
5.3.2 온라인해석 결과	• 94
5.3.1 시뮬레이션(Simulation) 모델의 설정	• 94
5.3 연결제진구조물의 online 지진응답실험	· 94
5.2 연결제진구조물의 모델화	· 91
5.1 Sub-structure online 지진응답실험의 개요	• 91

1.	마찰댐퍼	실험 사	진	 103
2.	추가해석	데이터		 106

- || -

표 차 례

표	2.1	알루미늄(A2017P-T3)과 SS400의 기계적 성질(인장실험결과)
표	2.2	성분분석(알루미늄)
표	2.3	성분분석(SS400) ~~~~ 7
표	2.4	실험체 개요 ~~~~ 10
표	2.5	미끄럼내력유지율(ξ) ······ 17
표	2.6	볼트의 도입장력(導入張力) 변동
표	3.1	해석 매개변수
표	3.2	기존 RC조 모델의 개요
표	4.1	해석결과 ~~~~ 80
표	5.1	시뮬레이션 모델의 설정

- ||| -

|--|

그림 2	2.1	전단형 마찰댐퍼의 상세도
그림 2	2.2	전단형 마찰댐퍼의 단면도
그림 2	2.3	전단형 마찰댐퍼의 재하실험
그림 2	2.4	알루미늄(A2017P-T3) 인장실험결과
그림 2	2.5	SS400 인장실험결과 ~~~~ 8
그림 2	2.6	알루미늄(A2017P-T3)과 SS400 인장실험결과 비교
그림 2	2.7	응력과 변형관계 - 볼트 M20(F10T) 인장실험결과
그림 2	2.8	반복재하 입력파형 W1
그림 2	2.9	반복재하 입력파형 W2
그림 2	2.10	반복재하 입력파형 W3
그림 2	2.11	반복재하 입력파형 W4
그림 2	2.12	반복재하 입력파형 W5
그림 2	2.13	고력볼트의 장력 측정 방법
그림 2	2.14	일방향 재하실험결과-미끄럼변위
그림 2	2.15	일방향 재하실험결과-초기강성
그림 2	2.16	입력파형에 따른 미끄럼내력유지율(ξ) ······ 16
그림 2	2.17	₩1-40 실험결과
그림 2	2.18	₩1-80 실험결과
그림 2	2.19	₩1-120 실험결과
그림 2	2.20	미끄럼내력과 누적변위 관계(누적변위 120cm)
그림 2	2.21	미끄럼내력과 누적변위 관계(누적변위 20cm)
그림 2	2.22	미끄럼계수와 누적변위 관계(누적변위 120cm)
그림 2	2.23	미끄럼계수와 누적변위 관계(누적변위 20cm)
그림 2	2.24	미끄럼내력과 볼트도입장력 관계
그림 2	2.25	미끄럼계수와 볼트도입장력 관계
그림 2	2.26	마찰면의 상태(볼트도입장력 To=40kN) ~~~~ 29
그림 2	2.27	마찰면의 상태(볼트도입장력 T₀=80kN)
그림 2	2.28	마찰면의 상태(볼트도입장력 T₀=120kN)

– IV –

그림	2.29	재하실험 종료 후의 상태	30
그림	2.30	완전탄소성모델	31
그림	2.31	반복입력파형 W1 해석모델	32
그림	2.32	반복입력파형 W5 해석모델	32

그림 3.	.1 해	석모델	34
그림 3.	.2 신	설 S조 각 질점에 작용하는 힘	35
그림 3.	.3 기	존 RC조 각 질점에 작용하는 힘	35
그림 3.	.4 연물	결제진구조물	40
그림 3.	.5 복음	원력특성	40

그림	4.1	기존RC조와 신설S조의 응답변위저감율 상관관계 40	3
그림	4.2	제진성능곡선의 정의	3
그림	4.3	입력지진파별 가속도 파형(200cm/sec ² 기준화)	5
그림	4.4	변위응답스펙트럼(Displacement response spectrum) 46	3
그림	4.5	퓨리에스펙트럼(Fourier spectrum) ~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	3
그림	4.6	제진성능곡선(주기비 T=0.25, EL-Centro1940(NS)) ~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	3
그림	4.7	제진성능곡선(주기비 T=0.5, EL-Centro1940(NS))	C
그림	4.8	제진성능곡선(주기비 T=1.5, EL-Centro1940(NS))	2
그림	4.9	제진성능곡선(주기비 T=2.5, EL-Centro1940(NS))	3
그림	4.10	제진성능곡선(주기비 T=0.25, JMA Kobe1995(NS))	3
그림	4.11	제진성능곡선(주기비 T=0.5, JMA Kobe1995(NS))	3
그림	4.12	제진성능곡선(주기비 T=1.5, JMA Kobe1995(NS))	C
그림	4.13	제진성능곡선(주기비 T=2.0, JMA Kobe1995(NS))	2
그림	4.14	제진성능곡선(주기비 T=0.25, TOHOKU UNIV.1978(NS))	4
그림	4.15	제진성능곡선(주기비 T=0.5, TOHOKU UNIV.1978(NS))	3
그림	4.16	제진성능곡선(주기비 T=1.5, TOHOKU UNIV.1978(NS))	3
그림	4.17	제진성능곡선(주기비 T=2.0, TOHOKU UNIV.1978(NS)))
그림	4.18	제진성능곡선(주기비 T=0.25, TAFT1952(EW))	2
그림	4.19	제진성능곡선(주기비 T=0.5, TAFT1952(EW))	4

- V -

그림	4.20	제진성능곡선(주기비 T=1.5, TAFT1952(EW))
그림	4.21	제진성능곡선(주기비 T=2.0, TAFT1952(EW))
그림	4.22	주기비에 따른 응답변위저감율의 경향
그림	4.23	제진성능곡선(T=0.5, m=2.0) ~~~~ 82
그림	4.24	제진성능곡선-가속도(T=0.5, m=2.0) ~~~~~ 85
그림	4.25	기존RC조의 제진성능곡선(T=0.5, m=2.0) ~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~
그림	5.1	연결제진구조물의 모델화 ~~~~~ 92
그림	5.2	Sub-structure online 실험의 개념도 ······ 92
그림	5.3	온라인 지진응답실험의 흐름과정
그림	5.4	Online 실험결과(Test Code-1)
그림	5.5	Online 실험결과(Test Code-2) ····· 98

- VI -

Abstract

Seismic Performance of Interaction Vibration Control System using Hysteresis Damper

Kim, Hyun soo Advisor : Prof. Choi, Jae hyouk, Department of Architectural Engineering, Graduate School of Chosun University

Earthquake resistant design for the school buildings have become an important issue as a lot of school buildings had been collapsed in the wake of the current Sichuan Province earthquake reaching a magnitude of 7.9 on the Richter Scale having been brought about in China in May, 2008, claiming a lot of human lives.

Maintaining safety for the school buildings is important more than anything else as these buildings are an open space for the students to spend most of their time there for school learning and for playing a role of providing emergency shelters against earthquake, typhoon and flooding for the regional citizens as well.

In addition, a new earthquake resistant renewal plan for the school buildings considering learning environment at the same time is required as an open space meeting the requirements of diversified learning patterns is called for as a result of

– VII –

introduction of a new educational method breaking away from the existing classroom patterns while maintaining earthquake resistant safety elements.

Currently, by the suggestion of several new vibration control systems, study on the quantification featuring energy absorption characteristics and the evaluation for the vibration control characteristics of the structures equipped with vibration control system is being progressed extensively. In addition, along with increase of the buildings equipped with diversified vibration control systems, this system is being widely utilized on a gradual basis for the purpose of earthquake resistant renewal and reduced earthquake response to be applied for the existing buildings as well as the newly constructed buildings.

Friction damper, a part of this system, has a high seviceability as this component is cheaper and highly reliable, without temperature dependability of attenuation performance or frequency dependability. Furthermore, design freedom for the designers could be expanded at the time of designing interaction vibration control structures since magnitude of initial strength or yield strength could be adjusted depending on the magnitude of applied tension.

Therefore, in this study, a interaction vibration control system is suggested for the school building renewal based on the difference of displaced response of the adjacent two buildings by utilizing friction dampers with a view to verifying earthquake resistant performance of the suggested interaction vibration control system. 기 호, 용 어

Fs	:	마찰력
μ	:	마찰 계수
С	:	압축력
ξ	:	미끄럼내력유지율
Q_s	:	안정미끄럼내력
Qu	:	최대미끄럼내력
R _d	:	최대응답변위저감율(%)
R _a	:	최대가속도저감율(%)
T _o	:	볼트도입장력
rad	:	호도법(弧度法)에 의한 각도의 단위(360°=2πrad)
gal	:	가속도 크기를 나타내는 CGS 단위(cm/sec²)
고유주기비(T)	:	신설S조의 주기/기존RC조의 주기(T _s /T _{RC})
질량비(m)	:	신설S조의 질량/기존RC조의 질량(M _s /M _{RC})
연결강성배율(α)	:	댐퍼의 강성/기존RC조의 강성(k _d /k _{RC})
항복내력비(β)	:	댐퍼의 항복내력/비연결시 기존RC조의 항복내력(Qd/QRC)

EL-Centro1940(NS)	:	1940년 미국 캘리포니아 Imperial Valley 남단 EL-Centro
		지방에서 발생한 규모 7.1의 지진(가속도 파형 중 남북방향 성분)
JMA Kobe1995(NS)	:	1945년 일본 고베 기상청에서 관측한 지진(가속도 파형 중 남북
		방향 성분)
TOHOKU UNIV.1978(NS)	:	1978년 일본 토호쿠대학에서 관측한 지진(가속도 파형 중 남북
		방향 성분)
TAFT1952(EW)	:	1952년 미국 TAFT에서 관측한 지진(가속도 파형 중 동서방향
		성분)

제1장 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

최근, 중국 스촨성 대지진(2008년 5월, 규모 7.9)으로 많은 학교 건축물이 붕괴되면 서 수많은 인명피해가 발생하여 학교 건축물의 내진화(耐震化)가 중요한 과제로 대두 되고 있다.¹⁾

학교 건축물은 학생들이 대부분의 시간을 보내는 학습의 장소임과 동시에, 지진(地震)·태풍(颱風)·수해(水害) 등의 재난 시에 지역주민의 응급피난장소의 역할²⁾을 하 고 있어, 안전성의 확보가 매우 중요하다. 또한 새로운 교육방법의 도입에 따라 다양 한 학습형태를 만족시키기 위한 다목적 공간이 필요하여 학습 환경을 고려한 새로운 내진개수(改修)계획이 요구된다.

최근, 새로운 제진장치가 많이 제안되고 에너지 흡수 특성의 정량화(定量化) 및 제 진(制振)장치를 장착한 구조물의 제진특성평가 등의 연구가 활발하게 이루어지고 있 다. 또한, 다양한 제진장치를 장착한 건축물의 증가와 더불어, 신설 건축물뿐만 아니 라 기존 건축물의 내진개수와 지진응답저감을 목적으로도 제진장치가 점차 널리 활용 되고 있다.

이러한 제진장치의 하나인 마찰댐퍼는 감쇠성능의 온도 의존성이나 주파수 의존성이 없고, 저렴하며 신뢰성이 높아 이용성이 높다. 또한 도입장력의 크기에 따라 초기강성 이나 내력의 크기를 조정할 수 있기 때문에 연결제진구조물의 설계 시 설계자의 설계 자유도를 확대할 수 있다.

따라서 본 논문에서는 학교건축물의 내진리뉴얼(seismic renewal)을 위해 마찰댐퍼 를 이용하여 인접한 두 건축물의 변위응답차이에 근거하는 연결제진시스템을 제안하 고, 제안한 연결제진시스템의 내진성능을 파악하고자 한다.

¹⁾ 학교건축물의 내진화 추진방향(윤영호, 대한주택공사 건설기술연구실장, 2008)

²⁾ 재난 및 안전관리기본법(2004), 자연재해대책법(1995), 지진재해대책법(2008)

1.2 기존의 연구

진동 특성이 다른 2개의 구조물을 댐퍼 등에 의해 연결하는 연결제진방법은 오래전 부터 알려져 있으며, 기계 진동의 분야에서는 동흡진기(動吸振器)와 같은 최적화 방법 이 이용되고 있다. 그러나 건축 내진분야에 있어서 연결제진구조가 이용되기 시작한 것은 비교적 최근의 일이다. 국내의 경우 강재 이력댐퍼에 대한 연구가 활발하게 진행 되고 있으나 댐퍼를 이용한 연결제진구조물에 대한 연구는 매우 부족한 실정이다.

IWANAMI(1986)^[10]은 2개의 독립한 구조물을 1개의 댐퍼로 연결하여 제진하는 경우의 해석을 실시하였다. 2 질점계에 대해 P, Q정점 이론을 응용하여 각 구조물을 최적으로 조정하는 것이 가능한 것을 밝혔다.

KAGEYAMA(1996)^[11]는 2개의 독립된 구조물 사이에서 발생하는 상대 변위를 댐퍼로 흡수함으로써 양측 구조물의 응답을 저감하는 제진방법을 보여주었다.

IWADA(1993)^[12]는 다수의 구조물이 연결되어 입체적으로 거동하는 경우의 제진효과 에 대해 검토를 하였다. 높이나 구조 형식이 다른 건축물을 고유 주기가 다른 1 질점 계 모델에 근사하고 점성댐퍼로 연결했을 경우의 제진효과를 나타냈다.

NAKAMO(2002)^[13]는 연결된 2개의 구조물의 연결부에 요구되는 내력의 평가법에 대해 검토를 하였다. 구조물을 연결할 경우 연결부의 강성을 충분히 확보하여 연결부를 강 체로 가정하고 정적인 힘의 균형으로부터 필요 내력을 평가할 수 있는 것을 나타냈다.

OHI(2004)^[14]는 연결된 2개의 구조물의 연결부에 이력형댐퍼 또는 탄성 용수철을 배 치했을 때의 제진성능에 관한 검토를 실시했다. 또한 응답 스펙트럼을 이용한 등가 선 형화 해석에 의해 연결된 구조물의 지진 응답을 간편하게 예측할 수 있는 것을 나타냈 다.

또한, 최근에는 초고층 건축물의 저층부와 고층부의 연결부에 댐퍼를 설치하는 등 연결제진기법을 실제의 건축물에 적용한 예도 증가하고 있다.

제2장 전단형마찰댐퍼(Shear type friction damper)의 특성과 준정적(準靜的, Quasi-static) 재하실험

2.1 전단형마찰댐퍼의 개요

(1) 전단형마찰댐퍼의 원리

마찰댐퍼는 접촉하는 2개의 재료 사이의 접촉부가 상대 변위에 의해 미끄러짐으로 서, 미끄러지는 방향과 역방향으로 마찰력이 발생하게 된다. 그 마찰력이 건축물의 진 동(振動)에 의한 소성변형(塑性變形)을 열에너지 형태로 발산시키는 댐퍼이다. 마찰력 과 압축력의 관계는 「Coulomb의 마찰의 법칙」을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있 다.

Fs= μ× C	(2.1)
C · 미차려	

Fs:마찰력 µ:마찰 계수 C:압축력

(2) 마찰의 원리

마찰에 관한 연구는 마찰의 개념을 처음으로 정의한 Leonardo da Vinci, 마찰을 표 면의 요철을 섭동하는 힘으로 정의한 G.Coulomb, 윤활(澗滑)이 개입했을 경우의 마찰 현상을 고려한 O.Reynolds 등 약 400년에 걸쳐 많은 연구자들에 의해 연구되어져 왔 다.

마찰의 법칙은 다음과 같다.

① 마찰력은 수직항력(하중)에 비례한다.

② 마찰력은 외관의 접촉 면적에 상관없다.

③ 마찰력은 미끄럼 속도와 무관하다.

기존의 연구에서는, 마찰댐퍼의 마찰재료에 대해 브레이크재료(복합 마찰재), 황동 과 알루미늄 합금판 등을 사용해 다양한 마찰댐퍼를 제작하여 brace형과 사잇기둥형에 마찰댐퍼를 장착하는 실제 실험을 수행하였다. 또한, 건축물의 주프레임(Main frame) 에 제진장치를 장착하여 지진 시에 건축물의 손상을 제어하는 기술의 개발이 진행되고 있다. 본 장에서는 2006~2008년 고베대학 지진공학·구조동역학연구실(Ohi & CHOI, 2005)에서 수행된 전단형 마찰댐퍼의 일방향 및 양방향 반복재하실험 결과를 토대로 재구성하여 연구하였다.

2.2 재하실험계획

마찰댐퍼의 구조적 특성을 파악하기 위하여 준정적 일방향 재하실험 및 양방향 재하 실험을 실시하였다.

2.2.1 실험체



그림 2.1 전단형 마찰댐퍼의 상세도



그림 2.2 전단형 마찰댐퍼의 단면도



그림 2.3 전단형 마찰댐퍼의 재하실험

- 5 -

실험체(그림 2.1 ~ 그림 2.3)는 2개의 T형의 강재를 덧댐판(SS400 강재)을 이용하여 볼트로 연결하고, T형의 웨브와 덧댐판 사이에 마찰재로서 3mm 두께의 알루미늄판 (A2017P-T3)³⁾을 삽입하였다. 상부의 T형 웨브(본 논문에서, 모재(母材)로 한다)에 슬 롲(Slot)구멍을 가공하여 덧댐판과 M20 고력볼트 2개로 연결하여, 양면을 마찰 접합이 되도록 구성하였다. 하부의 T형의 모재와 덧댐판은 M16 볼트 4개로 고정한다.

T형 강재 및 덧댐판에는 SS400 강재를 사용하고, 체결용 볼트로서 M20(F10T) 고력볼 트를 사용한다. 또, 볼트 체결을 위해 덧댐판에는 Ø26mm의 구멍을 뚫고, 모재에는 마 찰 시에 볼트와 모재 구멍 가장자리와의 접촉을 방지하기 위해서 폭 26mm× 길이 90mm 의 긴 슬롯구멍을 뚫는다.

실험체에서는 마찰면을 모재와 마찰재 사이로 한정하기 위해, 덧댐판과 마찰재의 접 촉면에 표면 거칠기(최대높이 Ry)가 50µm 이상이 되도록, shot blasting을 실시해 고 마찰화를 도모한다. M20(F10T) 고력볼트 도입장력은 인장 시험을 통한 하중과 변위관 계를 근거로 볼트 목 양쪽에 스트레인게이지(Strain gage)를 부착하여 변위량의 변화 량을 측정하면서 도입장력을 결정한다.

실험체에 사용된 모재의 SS400 강재의 판두께는 16mm이며, 알루미늄의 판두께는 3mm 이다. SS400강재로 제작한 모재는 실험 전 과정 동안 탄성범위에 머물러야 한다. 두께 가 얇을 경우 좌굴에 의한 변형이 예상되어 충분히 두께를 확보하기 위하여 16mm로 가 공하였다. 알루미늄(A2017P)은 실험 진행시 두께 1mm를 사용 할 경우 마찰에 의한 단 면의 마모로 마찰면의 손실이 예상되고 5mm의 강판을 사용 시에는 비경제적인 요인이 되어 3mm를 이용하였다.

마찰 접합용 고력볼트는 M20(F10T)를 사용하였다.

각각의 기계적 성질(준정적 인장 실험에 근거한다)을 표 2.1 및 그림 2.4 ~ 그림 2.7에 나타내었다. 또, 알루미늄재(A2017P-T3)와 SS400 강재의 화학 성분 분석 결과를 표 2.2, 표 2.3에 나타낸다.

³⁾ 알루미늄(A2017P)은 열처리 합금으로 강도가 높고 절삭 가공성이 좋아 각종 구조재료로서 널리 사용되고 있다. 특히, 마찰거동시 발생되는 열의 발산능력이 뛰어나 전도되는 열에 의한 구조적 특성 변화가 작기 때문에 마찰재료로서 주목받고 있다.

Test (Code	항복강도 ₀	인장강도 ₀ "	신장량 _{Э "} (%)	전단항복강도 ♂ ,,/√3
	01	358.4	441.7	14.6	206.9
A00170-T2	02	363.2	431.4	14.8	209.7
A2017P-13	03	349.8	432.7	14.5	201.9
	평균	357.1	435.3	14.6	206.2
	01	396.2	589.7	46.5	228.7
55400	02	398.7	583.8	45.2	238.5
33400	03	397.9	593.6	45.0	266.8
	평균	397.6	589.0	45.6	244.7

표 2.1 알루미늄(A2017P-T3)과 SS400의 기계적 성질(인장실험결과) [M mm²]

표 2.2 성분분석(알루미늄)

[%]

[%]

재질	화학 성분	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Ti+Zr
A2017P-T3	MIN	0.20	0.7	3.5	0.4	0.4	0.10	0.25	0.15	0.20
	MAX	0.8	0.7	4.5	1.0	0.8				

표 2.3 성분분석(SS400)

재질	C	Si	Mn	Р	S
SS400	0.11	0.11	0.19	0.022	0.004

- 7 -





그림 2.5 SS400 인장실험결과

- 8 -





그림 2.7 응력과 변형관계 - 볼트 M20(F10T) 인장실험결과

2.2.2 재하목표변위

재하목표 변위는 5종류의 반복 파형을 실시하였다. 반복재하 입력파형 1(₩1)은 실험

체의 전단변형각이 0.025, 0.05, 0.75, 0.1, 0.15(rad)가 되도록 설정하고, 진폭은 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3cm로 각각 3회씩 반복재하를 실시한다(그림 2.8). 반복재하 입 력파형 2(W2)는 비교적 작은 반복진동 하에서 마찰댐퍼의 거동을 파악하기위하여 전단 변형각이 0.025(rad), 진폭이 0.5cm로 40회 반복재하를 실시한다(그림 2.9). 반면에, 반복재하 입력파형 3(W3)은 실험체가 비교적 큰 입력진폭을 가지도록 전단변형각이 0.15(rad)가 되도록 설정하고 10회 반복재하를 실시한다(그림 2.10). 반복재하 입력파 형 4(W4)는 반복재하 입력파형 1과 같은 진폭으로 설정되어 있으나 입력순서는 반대로 한다(그림 2.11). 반복재하 입력파형 5(W5)는 실험체의 전단변형각이 0.15(rad)가 1 회, 0.025, 0.05(rad) 각각 21회씩 반복재하를 실시한다(그림 2.12). 실험명과 볼트 도입장력과 입력파형의 편성은 표 2.4에 나타낸다.

Test명	볼트 도입 장력(kN)	입력파형
W1-40	40	W1
W1-80	80	W1
W1-120	120	W1
W2-40	40	W2
W2-80	80	W2
W2-120	120	W2
W3-40	40	W3
W3-80	80	W3
W3-120	120	W3
W4-40	40	W4
W4-80	80	W4
W4-120	120	W4
W5-40	40	W5
W5-80	80	W5
W5-120	120	W5

표 2.4 실험체 개요

2.2.3 가력방법

실험체의 가력은 실험체 상, 하 플랜지를 M16 볼트로 가진 기구에 고정하고, 최대가 력하중 500kN 준정적 엑츄에이터(Actuator)에 의해 모재에 반복해 강제 변위를 준다. 변위는 5종류의 반복재하 입력파형을 순차적으로 반복가력 하며, 재하실험의 종료 후 에는 알루미늄 마찰재를 교체함으로 새로운 마찰댐퍼를 구성한다.

2.2.4 측정방법

- ▶ 하중 : 엑츄에이터(Actuator) 선단에 부착된 로드셀(Load Cell)로부터 측정
- ▶ 변위 : 실험체의 모재와 덧댐판간의 상대미끄럼량을 변위계(최대측정깊이 ± 5cm)로 측정한다.
- ▶ 고력볼트의 장력 관리 : 고력볼트 목 아래의 1cm에 부착한 2개의 스트레인게이지 (Strain gage)의 평균치를 이용해 도입 장력을 측정하면서 고력볼트의 장력을 도입 한다.(그림 2.13)



Time (sec)

그림 2.8 반복재하 입력파형 W1





그림 2.10 반복재하 입력파형 W3



- 12 -



그림 2.12 반복재하 입력파형 W5



그림 2.13 고력볼트의 장력 측정 방법

2.3 실험결과

2.3.1 준정적 일방향 재하실험(Monotonic loading test)의 결과

그림 2.14(a),(b)에 단조재하실험의 결과를 미끄럼변위와 미끄럼내력의 관계로 나타 내고, 그 때의 초기 강성, 최대미끄럼내력과 미끄럼변위를 나타낸다. 그림 2.14(b)에 나타난 바와 같이, 볼트도입장력이 서로 다른 세 경우 모두 초기 탄성 범위가 매우 작 은 것을 알 수 있다. 모든 실험체의 경우 미끄럼이 발생한 후 급속히 최대미끄럼내력 에 도달한 후 미끄럼내력 저하의 발생이 관찰되었다.

볼트도입장력 40kN의 경우 초기 강성은 426.30kN/mm으로 나타났다. 또, 볼트도입장 력 80kN와 볼트도입장력 120kN의 경우는 초기 강성이 각각 1242.20kN/mm, 2618.51kN/mm을 나타내었다(그림 2.15(a)~(c)).



그림 2.14 일방향 재하실험결과 - 미끄럼변위



- 14 -



그림 2.15 일방향 재하실험결과 - 초기강성

2.3.2 준정적 양방향 재하실험(Cyclic loading test)의 결과

반복재하실험 결과는 입력파형 W1 경우의 미끄럼변위와 미끄럼내력의 관계(그림 2.17~19(a)); 미끄럼내력 및 미끄럼 내력유지율과 누적변위의 관계(그림 2.17~19(b)); 미끄럼내력 및 미끄럼내력 계수와 누적변위의 관계(그림 2.17~19(c)); 미끄럼내 력 및 볼트의 장력과 누적변위의 관계(그림 2.17~19(d)); 볼트의 장력 및 볼트의 장력 유지율과 누적변위의 관계(그림 2.17~19(e))에 나타내었다.

 5 종류의 반복재하 입력파형 모두에 대해서 미끄럼이 발생하면서 최대미끄럼내력에 도달한 후 미끄럼내력이 점점 낮아지며 이 후로 매우 안정적인 이력곡선을 얻을 수 있 었다.

② 볼트도입장력 40kN, 80kN, 120kN의 각 5 종류 반복입력파형에 따른 실험체간의 최 대미끄럼내력, 안정미끄럼내력의 변동 특성을 고찰하기 위해, 미끄럼내력과 누적변위 량의 관계로 나타내었다(그림 2.20).

또한 그림 2.23은 안정 상태에 들어가기 전인 누적 변위량 20cm까지의 결과를 나타 낸다. 즉, 마찰 개시 후에 미끄럼내력이 급감한 후, 안정된 미끄럼내력을 유지해 마찰 하고 있음을 알 수 있다. 누적변위와 미끄럼내력의 관계는(정측과 부측을 정측에 표시 한다) 누적변위량이 약 15cm가 된 후, 각 경우의 미끄럼내력은 점차 안정 상태에 들어 가며, 누적미끄럼량이 120cm까지 안정된 상태를 유지한다. 볼트 도입 장력(40kN, 80kN, 120kN)이 증가하면, 최대미끄럼내력과 안정미끄럼내력이 그림 2.24에 나타낸바 와 같이, 직선 관계를 얻을 수 있다. 이를 통해 본 실험체의 볼트 도입 장력에 의한 최대미끄럼내력, 안정미끄럼내력을 추측할 수 있다.

③ 각 경우의 최대미끄럼내력과 안정미끄럼내력, 미끄럼내력 유지율을 표 2.5에 나타 낸다. 미끄럼내력 유지율의 최대값은 76.3%, 최저값은 59.4%이며, 각 경우의 평균치는 약 66.3%이다. 또한, 입력파형에 따른 미끄럼내력유지율과의 관계를 그림 2.16에 나타 내었다.

 $\xi = (Q_s/Q_u) * 100$ (2.2)

ξ: 미끄럼내력유지율 Q_s: 안정미끄럼내력 Q_u: 최대미끄럼내력



그림 2.16 입력파형에 따른 미끄럼내력유지율(ξ)

Test명	볼트 장력(kN)	입력파형	볼트 도입 장력 To(kN)	최대미끄럼 내력 Qu(kN)	안정미끄럼 내력 Qs(kN)	미끄럼내력 유지율 ξ(%)
W1-40		W1	39.8	48.7	30.1	61.8
W2-40		W2	40.6	53.2	40.6	76.3
W3-40	40kN	W3	39.4	51.4	33.0	64.2
W4-40		W4	39.4	45.6	33.7	73.9
W5-40		W5	39.0	42.8	28.8	67.4
	평 균		39.6	48.3	33.2	68.7
W1-80		W1	78.6	107.3	65.8	61.3
W2-80		W2	78.8	106.5	66.8	62.7
W3-80	80kN	WЗ	78.9	108.6	77.8	71.6
W4-80		W4	78.4	96.7	66.4	68.7
W5-80		W5	78.7	136.8	81.3	59.4
	평 균		78.7	111.2	71.6	64.7
W1-120		W1	119.7	157.0	103.1	65.7
W2-120		W2	117.5	162.1	104.4	64.4
W3-120	120kN	W3	117.3	154.5	98.8	63.9
W4-120		W4	118.0	162.3	105.5	65.0
W5-120		W5	118.7	169.5	115.1	67.9
	평 균		118.2	161.1	105.4	65.4
	ਤ ਹ					66.3

표 2.5 미끄럼내력유지율(ξ)



(a) 미끄럼내력과 미끄럼변위와의 관계



(b) 미끄럼내력 및 미끄럼내력유지율-누적변위

(c) 미끄럼내력 및 미끄럼계수-누적변위 관계

관계





(d) 미끄럼내력 및 볼트장력-누적변위 관계 (e) 볼트장력 및 볼트장력유지율-누적변위 관계

그림 2.17 W1-40 실험결과

- 18 -



(a) 미끄럼내력과 미끄럼변위와의 관계



(b) 미끄럼내력 및 미끄럼내력유지율-누적변위 관계

(c) 미끄럼내력 및 미끄럼계수-누적변위 관계



(d) 미끄럼내력 및 볼트장력-누적변위 관계 (e) 볼트장력 및 볼트장력유지율-누적변위 관계

그림 2.18 W1-80 실험결과



(a) 미끄럼내력과 미끄럼변위와의 관계



(b) 미끄럼내력 및 미끄럼내력유지율-누적변위 관계

미끄림내력 Q(kN)

(c) 미끄럼내력 및 미끄럼계수-누적변위 관계





그림 2.19 W1-120 실험결과

- 20 -



그림 2.20 미끄럼내력과 누적변위 관계(누적변위 120cm)

- 21 -



그림 2.21 미끄럼내력과 누적변위 관계(누적변위 20cm)


그림 2.22 미끄럼계수와 누적변위 관계(누적변위 120cm)

- 23 -



그림 2.23 미끄럼계수와 누적변위 관계(누적변위 20cm)

- 24 -



그림 2.24 미끄럼내력과 볼트도입장력 관계



그림 2.25 미끄럼계수와 볼트도입장력 관계

2.3.3 미끄럼계수의 변동 특성

$$\mu = \frac{F_s}{m \cdot N \cdot T_o} \tag{2.2}$$

여기서, F_s : 미끄럼내력 m: 마찰면수 N: 볼트의 개수 T_s : 초기도입장력

본 실험에서 미끄럼계수(µ)는 강제 변위에 수반해 생긴 미끄럼내력을 볼트 초기 도 입장력의 평균치와 마찰면수, 볼트의 개수로 나눈 값을 나타내고 있다. 정측 미끄럼계 수와 부측 미끄럼계수를 아울러, 각 경우의 미끄럼내력과 미끄럼계수, 누적변위의 관 계를 그림 2.17~19(c)에 나타냈다. 그림 2.17~19(c)에 나타낸 바와 같이 미끄럼계수의 변동 경향과 미끄럼내력의 변동 경향이 대체로 일치하고 있다. 볼트도입장력 40kN, 80kN, 120kN의 각 5 종류 입력파형의 반복 마찰거동에 따른 미끄럼계수와 누적변위량 의 관계는 그림 2.22에 나타낸다. 또 그림 2.23은 누적변위량 20cm까지의 그림만을 확 대해, 안정 상태에 들어가기 전의 결과를 나타낸다. 즉, 마찰 개시 후에 최대미끄럼계 수에 도달한 후 미끄럼계수가 급감하여 안정된 미끄럼계수를 유지해 마찰거동을 했다.

누적변위와 미끄럼계수의 관계는(여기는 정측과 부측을 정측에 표시한다) 누적 변위 량이 약 15cm가 된 후, 각 경우의 미끄럼계수는 점차 안정 상태가 되며 가력종료 (120cm)까지 안정 상태를 유지하였다. 최대 미끄럼계수, 안정 미끄럼계수와 볼트 도입 력의 관계는 그림 2.25에 나타낸다. 볼트도입장력이 증가하면, 최대미끄럼계수와 안정 미끄럼계수가 그림 2.25에서 보듯이, 약간 증가하는 경향을 볼 수 있다. 이 결과에서, 볼트도입장력에 의해 최대미끄럼계수, 안정미끄럼계수를 추측할 수 있다.

2.3.4 볼트 초기도입장력(導入張力)의 거동

미끄럼내력과 볼트 장력, 누적변위 관계는 그림 2.17~19(d)에, 볼트 장력과 볼트 장

- 26 -

력 유지율, 누적변위 관계는 그림 2.17~19(e)에 나타냈다.

입력파형 W2, W3의 경우는 반복 마찰거동에 따른 볼트의 장력은 완만하게 상승하고, 실험 종료 시의 볼트 장력은 초기 도입 볼트 장력의 1.08~1.12배가 되었다. 한편, 입 력파형 W1, W4, W5의 경우는 반복 마찰거동에 따른 볼트의 장력이 감소하는 경우도 관 찰되었지만, 대체로 볼트 장력의 변화는 작고, 실험 종료 시의 볼트 장력은 초기 볼트 도입장력에 대해서 0.92~0.99배가 되었고 그 결과를 표 2.6에 나타냈다. 각 경우의 볼 트장력 변동율의 평균치는 10% 이내가 된다.

볼트장력 변동율= [(최대장력-최소장력)/볼트 도입장력]× 100%

실험 결과 볼트 도입 장력 변동량은 작으며, 마찰거동 시에 대체로 일정한 볼트 장 력의 유지가 가능함을 알 수 있다.

Test B	입력파형	도입장력(kN)	최대장력(kN)	최소장력(kN)	장력 변동량(kN)	장력 변동율(%)
W1-40	W1	39.8	42.3	39.3	3.1	7.7
W1-80	W1	78.6	85.5	78.5	7.0	8.9
W1-120	W1	119.7	122.5	118.5	4.0	3.3
W2-40	W2	40.6	47.8	38.3	9.5	23.3
W2-80	W2	78.8	90.3	78.9	11.4	14.4
W2-120	W2	117.5	123.9	117.3	6.6	5.6
W3-40	WЗ	39.4	39.5	36.0	3.5	8.8
W3-80	WЗ	78.9	78.6	69.4	9.2	11.6
W3-120	WЗ	117.3	120.8	113.6	7.2	6.1
W4-40	W4	39.4	40.1	37.5	2.6	6.5
W4-80	W4	78.4	81.4	76.4	5.0	6.3
W4-120	W4	118.0				
W5-40	W5	39.0	41.0	37.7	3.3	8.5

표 2.6 볼트의 도입장력(導入張力) 변동

W5-80	W5	78.7	83.7	78.5	5.2	6.6
W5-120	W5	118.7	120.8	117.5	3.3	2.8

2.3.5 미끄럼면의 마모

실험 종료 후 각 경우의 마찰 표면의 상태는 그림 2.26~28과 같다.

각 표면의 상태로부터, A2017P-T3과 SS400재의 접촉면에서 주로 알루미늄 마찰재가 절삭 마모에 의해 손상을 받는 것으로 나타났다. 볼트 도입장력이 작은 경우 알루미늄 재와 SS400재 양쪽 모두의 마모도 작은, 주로 응착(凝着) 마모이다. 한편, 볼트 도입 장력이 큰 경우는 알루미늄 마찰재의 절삭마모가 격렬해지는, 절삭 마모를 볼 수 있 다.

- İ 볼트도입장력 40kN의 5종류의 입력파형의 경우에, 알루미늄과 SS400재의 마모에 의 한 손상은 경미한 주로 응착 마모이다(그림 2.26).
- ② 볼트도입장력 80kN의 5종류의 입력파형의 경우에, 알루미늄 마찰재의 절삭마모에 의한 손상이 관찰되었다. 절삭마모에 의한 마모 분말(그림 2.27 마찰면의 검은 부 분)은 대량으로 알루미늄 마찰재에서 발생하였다(그림 2.29). 이것은 알루미늄 마 찰재의 마모 분말이 접촉부로부터 배출되었다고 추측된다. SS400재의 절삭마모에 관한 손상은 경미하였다.
- ③ 볼트도입장력 120kN의 5종류의 입력파형에 대해서 도입장력 80kN의 경우와 같은 경 향을 나타내며 그 손상의 정도는 크게 나타났다. 알루미늄 마찰재의 절삭마모에 의 한 마모분말의 양이 많아지고, 이 마모 분말이 마찰부로부터 배출할 수 없게 되어, 절삭 마모가 일어난 곳 안에 겹쳐 쌓여 있었다. 이것은 절삭 마모가 더 심해진 하 나의 원인으로 볼 수 있다.



그림 2.26 마찰면의 상태(볼트도입장력 T₀=40kN)



그림 2.27 마찰면의 상태(볼트도입장력 T₀=80kN)

- 29 -





그림 2.28 마찰면의 상태(볼트도입장력 T₀=120kN)



그림 2.29 재하실험 종료 후의 상태

2.3.6 마찰음

볼트도입장력 40kN의 경우는 소진폭으로부터 대진폭까지 무소음이었다. 하지만 볼트 도입장력 80kN과 120kN의 경우에서는 소진폭 미끄럼 시, 작은 금속간의 미끄럼 충격음 이 발생하고, 특히 가력방향이 전환되는 시점에서 그 충격음이 다소 크게 발생하였다.

2.4 마찰댐퍼의 복원력 특성 모델

2.4.1 해석모델(완전탄소성모델)

실험에 의해 얻어진 마찰댐퍼의 복원력 특성을 적절한 해석 모델로 평가하기 위해, 본 논문에서는 마찰댐퍼의 이력거동을 완전탄소성 복원력 모델을 적용하였다(그림 2.30). 이 모델은 항복점까지는 초기 강성 k로 진행되어(OA), 항복점에 이르면 힘은

그대로이고 변형만이 진행(AB)하며, 하중이 감소 (속도가 반전)하면 초기 강성으로 돌아와(BC), 역 방향의 항복력에 이르면 다시 항복해 변형만이 진 행된다(CD). 본 연구에서의 마찰댐퍼의 초기 강성 은 볼트도입장력 40kN, 80kN, 120kN의 경우 각각 4263.0kN/cm, 12422.0kN/cm, 26185.1kN/cm으로 설 정하였다. 5종류 입력파형에 대해서 미끄럼내력은 다르므로 안전 측면을 고려하기 위해서, 여기에서 는 마찰댐퍼의 각 경우 안정 내력의 최저치 (33.32kN, 65.86kN, 98.8 kN)를 해석 모델에 적용 하였다.



그림 2.30 완전탄소성모델

2.4.2 해석결과

복원력 특성 모델에 완전탄소성 복원력 특성 모델을 사용했을 경우의 해석 결과를 그림 2.31, 그림 2.32에 실험 결과와 함께 나타냈다(입력파형 W1와 W5). 다음 결과를 통해 실험 결과와 해석 결과가 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

- 31 -



그림 2.31 반복입력파형 W1 해석모델 그림 2.32 반복입력파형 W5 해석모델

본 장에서는 마찰댐퍼의 개요 및 준정적 재하실험을 실시하여 다음의 결과를 얻을 수 있었다.

- 준정적 하중 하에 있어서의 마찰댐퍼 역학적 특성을 파악하는 것을 목적으로 5종류
 의 입력파형에 대한 반복재하실험을 실시하여, 마찰댐퍼의 볼트의 도입 장력의 차
 이에 따른 미끄럼내력, 미끄럼계수, 볼트의 도입장력의 거동에 대하여 연구하였다.
- ② 마찰댐퍼의 복원력 특성 모델로서 완전탄소성모델을 이용하여 매우 정밀하게 이력 거동을 나타낼 수 있었다. 다만, 초기미끄럼내력 증가 및 안정미끄럼내력에 이르기 까지의 미끄럼내력 감소의 영향을 고려할 필요가 있다.

제3장 연결제진(連結制振)구조물의 지진 응답 해석

3.1 연결제진(連結制振)구조물의 지진 응답 해석 개요

본 장에서는, 마찰을 2개동의 3층 구조물을 연결한 것을 예로서 연결제진구조물의 운동방정식을 유도한다.

3.1.1 운동방정식

해석 모델은 그림 3.1과 같이 최상층, 중간층, 최하층을 포함하고 있는 3층의 구조 물을 가정하였다. 여기서 지반운동의 변위를 yo, S조와 RC조의 질점의 질량을 ms, mac, 각 구조물의 강성을 ks, kac, 점성 감쇠 계수를 Cs, Cac, 지반운동에 대한 상대 변위를 ys, yac, 댐퍼 강성을 kdi(i=1,2,3), 마찰댐퍼의 복원력을 Qdi(i=1,2,3)로 하여, 운동방 정식을 유도한다.



그림 3.1 해석모델



신설 S조 그림 3.2 신설 S조 각 질점에 작용하는 힘



그림 3.3 기존 RC조 각 질점에 작용하는 힘

각 질점에 작용하는 힘은 그림 3.2, 3.3에 나타내었다. 다만, 연결 시에도 감쇠 정 수의 값은 변하지 않는 것으로 한다. 기존 RC조의 항복에 따른 내력저하의 정도를 파 악하기 위하여 1차 구배와 2차 구배만을 표현한 완전탄소성(bi-linear) 형태로 모델링 하였다. 반면에, 신설 S조의 경우는 항복변위 이하에 두는 것을 목적으로 탄성으로 상 정한다.

그림 3.2, 3.3을 참고로 각 질점에서의 힘의 평형을 생각하면, 운동방정식으로 식 (3.1) 및 식(3.2)와 같이 얻을 수 있다.

	m _{RC1ÿRC1} +(k _R	_{C1} +k _{RC2} +k _{d1})y _{RC1}	-k _{RC2}	y _{RC2}		-k	K _{d1} y _{s1}	=-M _{RC1ÿO}
RC조	m _{RC2ÿRC2}	-k _{RC2}	y _{RC1}	+(k_{RC2} + k_{RC3} + k_{d2})y _{RC2}	-k _{RC3}	y _{RC3}	$-k_{d2}y_{s2}$	=-m _{RC2ÿ0}
	m _{RC3ÿRC3}			-k _{RC3}	y _{RC2}	+(k _{RC3}	+k _{d3})y _{RC3}	-k _{d3} y _{s3}	=-m _{RC3ÿ0}
									(3.2)

여기서, 질량 매트릭스[M]=



감쇠 매트릭스[C]=

$$\begin{bmatrix} c_{s1} + c_{s2} & -c_{s2} & 0 \\ - c_{s2} & c_{s2} + c_{s3} - c_{s3} & \\ & - c_{s3} & c_{s3} & \\ & & c_{RC1} + c_{RC2} & - c_{RC2} & \\ & & & - c_{RC2} & c_{RC3} - c_{RC3} \\ 0 & & & - c_{RC3} & c_{RC3} \end{bmatrix}$$

강성 매트릭스[K]=

$$\begin{bmatrix} k_{s1} + k_{s2} + k_{d1} & -k_{s2} & 0 & -k_{d1} & 0 & 0 \\ -k_{s2} & k_{s2} + k_{s3} + k_{d2} & -k_{s3} & 0 & -k_{d2} & 0 \\ 0 & -k_{s3} & k_{s3} + k_{d3} & 0 & 0 & -k_{d3} \\ -k_{d1} & 0 & 0 & k_{RC1} + k_{RC2} + k_{d1} & -k_{RC2} & 0 \\ 0 & -k_{d2} & 0 & -k_{RC2} & k_{RC2} + k_{RC3} + k_{d2} - k_{RC3} \\ 0 & 0 & -k_{d3} & 0 & -k_{RC3} + k_{d2} - k_{RC3} \end{bmatrix}$$



3.1.2 시간이력 지진응답해석

일반 좌표에서 모드 좌표로의 좌표변화는, 탄성계의 고전적 기준 모드의 고유 모드 벡터 **{ıu**}(i=1, 2…N)를 요구하고, 그 모드참여계수 벡터 **ι**β**{ıu**}를 열로 하는 모드참 여계수 매트릭스 **[Φ]={ıβ{ıu},₂β{₂u},…,nβ{nu}}**를 이용하여, 식(3.4)와 같이 변위 의 변환을 정의한다.

$$\{x\} = [\phi] \cdot \{q\} \tag{3.4}$$

여기서, ¡β : i차의 모드참여계수, {q} : 모드 변위 벡터이다.

- 37 -

기존 좌표계의 변위 **{y**}와 복원력 **{f**}에 의한 일은, 좌표 변화된 모드 좌표계에 대 해서도 불변이다. 따라서 모드 좌표계에 변위 **{q}** 및 해당 복원력 **{r}** (모드 복원력 벡터)에 관한 일은 불변하다는 것을 고려하면, 식(3.5)가 성립된다.

$$\{f\}^{T} \cdot \{x\} = \{r\}^{T} \cdot \{q\}$$
(3.5)

식(3.4)를 식(3.5)에 대입하여 정리하면 식(3.6)이 성립된다.

$$\{q\}^T \cdot \left(\{r\} - \left[\phi^T\right] \cdot \{f\}\right) = 0 \tag{3.6}$$

식(3.6)으로부터 일반 좌표계와 모드 좌표계의 힘의 변환은 식(3.7)과 같이 정의된다. $\{f\} = \left[\phi^T \right]^{-1} \cdot \{r\}$ (3.7)

식(3.4)를 식(3.3)에 대입하면 모드 좌표계의 운동 방정식은 식(3.8)로 주어진다.

$$[\phi]^T \cdot [M] \cdot [\phi] \cdot \{\ddot{q}\} + [\phi]^T \cdot [C] \cdot [\phi] \cdot \{\dot{q}\} + [\phi]^T \cdot \{f\} = -[\phi]^T \cdot [M] \cdot \{1\} \ddot{y}_0 \qquad (3.8)$$

각 차 고유 벡터와의 직교성으로부터, 질량 매트릭스 및 강성 매트릭스는 식(3.9) 및 식(3.10)과 같이 대각화 된다.

$$[\phi]^{T} \cdot [M] \cdot [\phi] = \left[diag(_{i} M^{*}) \right] \quad i = 1, 2, \cdots, n$$
(3.9)

$$[\phi]^{T} \cdot [K] \cdot [\phi] = \left[diag\left(_{i} K^{*}\right) \right] \quad i = 1, 2, \cdots, n$$
(3.10)

여기서, ¡K*: i차 탄성 기준 스프링 정수

감쇠 매트릭스[C]는 질량 매트릭스나 강성 매트릭스와 같이 대각화 되지 않지만, 본 논문에서는 비대각항은 0으로 하고 식(3.11)에서처럼 대각항만을 사용한다.

$$[\phi]^{T} \cdot [C] \cdot [\phi] = \left[diag(_{i}C^{*}) \right] \quad i = 1, 2, \cdots, n$$

$$(3.11)$$

여기서, í**C*=2·ih·iw·iM***: i차 모드 감쇠 계수 ih:i차 모드 감쇠 정수

- 38 -

이상으로, 운동 방정식을 모드 좌표계로 표현하면 식(3.12)와 같이 된다.

$$_{i}\ddot{q} + 2 \cdot_{i} h \cdot_{i} \omega \cdot_{i} \dot{q} + \frac{_{i}r}{_{i}M^{*}} = -\ddot{y}_{0} \quad i = 1, 2, \cdots, n$$
(3.12)

식(3.12)에 중앙차분법을 적용하면, 모드 변위 증분의 방정식은 식(3.13)과 같다.

$$\Delta_{i}q^{k \to k+1} = \frac{\left(1 - i h \cdot i \omega \cdot \Delta t\right) \Delta_{i}q^{k-1 \to k} - \Delta t^{2} \left(\frac{i r^{k}}{i M^{*}} + \ddot{y}_{0}\right)}{1 + i h \cdot i \omega \cdot \Delta t} \quad i = 1, 2, \cdots, n$$
(3.13)

마찰댐퍼를 이용하여 시간이력응답해석을 실시할 때, 운동 방정식은 식(3.3)을 이용 한다. 일반좌표계 (카의 산출 방법에 대해

{↗={ 구조물▲의복원력 + 마찰댐퍼의복원력} 와 같이 계산하고, 일반좌표계로부터 모 구조물▶의복원력 — 마찰댐퍼의복원력} 드좌표계에의 힘의 변환은 식(3.7)을 이용한다.

3.2 연결제진(連結制振)구조물의 해석모델

여기서, 제진댐퍼를 이용해 2개의 1자유도 구조물을 연결한 것을 연결제진구조물이 라고 정의한다. 연결제진구조물의 각각의 고유주기, 질량 및 강성을 바꾸어 시간이력 응답해석을 실시하여 각 구조물에게 미치는 영향에 대해 일반적 경향을 검토한다.

해석 모델은 그림 3.4와 같은 강성 k_d, 항복내력 Q_d의 마찰댐퍼에 의해 병진진동만 이 생기도록 연결한 2개의 전단형 1질점계 모델을 이용한다. 신설 S조, 기존 RC조의 단독 진동시의 감쇠 정수는 h_s=0.02, h_{RC}=0.03으로 한다. 연결 시에도 감쇠정수의 값은 변하지 않는 것으로 한다.

마찰댐퍼의 복원력 특성은, 완전탄소성형으로 한다(그림 3.5). 마찰댐퍼의 초기 강 성 kd는 kd = km× α(연결강성배율)이고, 항복 내력 Qd는 기존 RC조 단독시(비연결시) 에 있어서의 최대 응답 전단력에 β(항복내력비)를 곱한 것이다.

- 39 -

Qd = 기존 RC조의 최대응답전단력(비연결시)× 항복내력비(β)



기존 RC조의 고유 주기를 Trc=0.2(sec), 고유주기비(Ts/Trc), 신설 S조와 기존 RC조의 질량비(Ms/Mrc), 이력형댐퍼의 초기 강성과 기존 RC조의 강성비를 연결강성배율α(α =kd/krc), 이력형댐퍼의 항복내력비 β(이력형댐퍼의 항복 내력/기존 RC조의 비연결시 최대 응답 전단력)를 해석 매개변수로 한다. 또, 기존 RC조의 고유주기 Trc를 변화시 켜 연결제진에 미치는 영향을 고찰한다. 표 3.1, 표 3.2에 해석 매개변수와 기존 RC조 모델의 개요를 나타낸다.

덧붙여 고유주기비 T(Ts/Tmc), 질량비 m(ms/mmc)으로 건축물 상호의 조합을 연결강성 배율 α, 항복내력비 β로 연결하는 이력형댐퍼의 특성을 평가한다. 연결강성배율 α =0, 항복내력비 β=0은 기존 RC조·신설 S조가 비연결시의 응답 변위이다.

시간이력응답해석에 있어서의 운동 방정식의 수치적분에는 중앙 차분법을 이용해 단 위 시간 △t=0.005 (sec)로 하고 있다.

- 40 -

표 3.1 해석 매개변수

해석 매개변수	범 위
고유주기비 (T _S /T _{RC})	0.25, 0.5, 1.5, 2.0
질량비 (M _S /M _{RC})	0.5, 1.0, 1.5, 2.0
연결 강성 배율 α (k _d /k _{RC})	1~5 (0.5간격)
항복 내력비 β (Q _d /Q _{RC})	0.046~1.886 (Q _d =25~1000kN)

표 3.2 기존 RC조 모델의 개요

고유주기 (sec)	중 량 (kN)	강 성 (kN/mm)	
0.20	5100	490	

본 장에서는, 2개의 구조물을 마찰댐퍼로 연결한 연결제진구조물의 지진 응답 해석 에 대해 설명하였다. 해석모델을 통해 운동방정식을 정의하고 시간이력응답해석을 위 한 매개변수를 설정하였다. 해석결과는 4장에 나타낸다.

제4장 제진성능(制振性能)곡선

4.1 제진성능곡선

본 장에서는, 마찰댐퍼를 이용하여 두 건축물을 연결했을 경우 최대응답변위의 저감 율에 대하여 검토하였다. 최대응답변위저감율(Rd)은 식(4.1)로 나타낼 수 있다.

 $R_d = (X_{non} - X_{connect}) / X_{non} \times 100$ (4.1)

 R_d : 최대응답변위저감율(%)

 X_{non} : 비연결시 최대응답변위

 $X_{connect}$: 연결시 최대응답변위

연결강성배율 α(Kd/Knc), 항복내력비 β(Qd/Qnc)에 따른 RC조 구조물의 최대응답변 위저감율을 세로축으로 하고 S조 구조물의 최대응답변위저감율을 가로축으로 하는 연 결제진구조물의 제진성능곡선을 작성하였다.

이러한 제진성능곡선은 두 구조물의 최적응답변위저감율에 대응하는 연결강성배율 α(Kd/Kmc), 항복내력비 β(Qd/Qmc)를 얻을 수 있기 때문에, 마찰댐퍼의 설계 시에 필 요한 정보를 얻을 수 있다. 또한, 두 구조물의 상호 조합(주기비, 질량비)에 따른 마 찰댐퍼의 최적 특성지표(연결강성배율 α, 항복내력비 β)를 얻을 수 있으므로 구조물 조합에 따른 제진성능곡선을 작성하는 것으로, 두 구조물의 최적응답변위저감율을 예 측할 수 있다.

그림 4.1에 기존 RC조와 신설 S조의 응답변위저감율 상관관계를 나타내었고 그림 4.2에 제진성능곡선의 정의를 나타내었다. 제진성능곡선에서 기존 RC조와 신설 S조의 응답변위가 동시에 감소하면서 응답변위저감율이 가장 큰 부분에서 최적댐퍼설치량을 알 수 있다.

- 42 -

기존RC조의 응	답변위저감율
RC조 Good (변위감소)	RC조 Good (변위감소)
S조 Not Good (변위증가)	S조 Good (변위감소)
	신설\$조의 응답변위저감율
RC조 Not Good (변위증가)	RC조 Not Good (변위증가)
S조 Not Good (변위증가)	S조 Good (변위감소)

그림 4.1 기존RC조와 신설S조의 응답변위저감율 상관관계



- 43 -

4.2 해석결과

마찰댐퍼로 연결된 2동의 건축물의 시간이력지진응답해석을 실시하여, 다음의 항목에 대해 신설 S조와 기존 RC조에 미치는 영향을 연구하였다.

- (1) 건축물 조합의 영향(주기비 및 질량비)
- (2) 입력지진파의 영향
- (3) 가속도저감율

(1) 건축물 조합의 영향

건축물의 조합에서 기존 RC조의 고유주기는 0.2(sec)로 설정하였다. 고유주기비 T(Ts/Tmc) 및 질량비 m(ms/mmc)의 분포에 따른 연결강성배율 α(Kd/Kmc), 항복내력비 β (Qd/Qmc)를 분석함으로서 마찰댐퍼의 특성을 파악할 수 있다. 따라서 각 건축물의 조 합에서 최적의 댐퍼를 평가하기 위해서 가로축을 신설 S조의 최대응답변위저감율, 세 로축을 기존 RC조의 최대응답변위저감율로 하고 연결강성배율 α(Kd/Kmc), 항복내력비 β(Qd/Qmc)의 값에 따라 그래프 상에 최대응답변위저감율을 나타낸다. 각 변수의 값은 표 3.1과 같다.

(2) 입력지진파의 영향

입력지진파의 종류에 의한 연결제진의 영향을 고찰한다. EL-Centro1940(NS)파, JMA Kobe1995(NS)파, TOHOKU UNIV.1978(NS)파, TAFT1952(EW)파를 200gal에 기준화하여, 입 력지진파에 의한 차이를 비교·검토한다. 그림 4.3에 입력지진파별 가속도 파형, 그림 4.4에 변위응답스펙트럼(Displacement response spectrum), 그림 4.5에 퓨리에스펙트럼 (Fourier spectrum)을 나타낸다.

그림 4.6~4.21에 해석 결과를 나타내었다. 여기서 마이너스부호(-)는 연결시의 신설 S조 또는 기존 RC조의 최대응답변위가 비연결시보다 증가한 것을 나타낸다.





그림 4.3 입력지진파별 가속도 파형(200cm/sec² 기준화)

- 45 -



그림 4.4 변위응답스펙트럼(Displacement response spectrum)



그림 4.5 퓨리에스펙트럼(Fourier spectrum)

- 46 -



- 47 -



그림 4.6 제진성능곡선(주기비 T=0.25, EL-Centro1940(NS))

- 48 -



(a) 주기비 T=0.5, 질량비 m=0.5



(b) 주기비 T=0.5, 질량비 m=1.0



그림 4.7 제진성능곡선(주기비 T=0.5, EL-Centro1940(NS))

- 50 -



신설S조의 최대응답변위저감율 sRd (%)

(a) 주기비 T=1.5, 질량비 m=0.5



신설S조의 최대응답변위저감율 sRd (%)

(b) 주기비 T=1.5, 질량비 m=1.0

- 51 -



그림 4.8 제진성능곡선(주기비 T=1.5, EL-Centro1940(NS))

- 52 -



신설S조의 최대응답변위저감율 sRd (%)

(a) 주기비 T=2.0, 질량비 m=0.5



(b) 주기비 T=2.0, 질량비 m=1.0



그림 4.9 제진성능곡선(주기비 T=2.0, EL-Centro1940(NS))



(a) 주기비 T=0.25, 질량비 m=0.5



(b) 주기비 T=0.25, 질량비 m=1.0

- 55 -



그림 4.10 제진성능곡선(주기비 T=0.25, JMA Kobe1995(NS))

- 56 -



(a) 주기비 T=0.5, 질량비 m=0.5



(b) 주기비 T=0.5, 질량비 m=1.0



그림 4.11 제진성능곡선(주기비 T=0.5, JMA Kobe1995(NS))

- 58 -


(b) 주기비 T=1.5, 질량비 m=1.0



그림 4.12 제진성능곡선(주기비 T=1.5, JMA Kobe1995(NS))



신설S조의 최대응답변위저감율 sRd (%)

(a) 주기비 T=2.0, 질량비 m=0.5



(b) 주기비 T=2.0, 질량비 m=1.0



그림 4.13 제진성능곡선(주기비 T=2.0, JMA Kobe1995(NS))



(a) 주기비 T=0.25, 질량비 m=0.5



(b) 주기비 T=0.25, 질량비 m=1.0



(d) 주기비 T=0.25, 질량비 m=2.0

그림 4.14 제진성능곡선(주기비 T=0.25, TOHOKU UNIV.1978(NS))

- 64 -



(a) 주기비 T=0.5, 질량비 m=0.5



(b) 주기비 T=0.5, 질량비 m=1.0

^{- 65 -}



그림 4.15 제진성능곡선(주기비 T=0.5, TOHOKU UNIV.1978(NS))

- 66 -



(a) 주기비 T=1.5, 질량비 m=0.5



선혈5조의 좌대등급한뒤지점할 Shu (&

(b) 주기비 T=1.5, 질량비 m=1.0

- 67 -



그림 4.16 제진성능곡선(주기비 T=1.5, TOHOKU UNIV.1978(NS))

- 68 -



신설S조의 최대응답변위저감율 sRd (%)

(a) 주기비 T=2.0, 질량비 m=0.5



신설S조의 최대응답변위저감율 sRd (%)

(b) 주기비 T=2.0, 질량비 m=1.0



그림 4.17 제진성능곡선(주기비 T=2.0, TOHOKU UNIV.1978(NS))

- 70 -



(a) 주기비 T=0.25, 질량비 m=0.5



(b) 주기비 T=0.25, 질량비 m=1.0



그림 4.18 제진성능곡선(주기비 T=0.25, TAFT1952(EW))

- 72 -



신설S조의 최대응답변위저감율 sRd (%)

(a) 주기비 T=0.5, 질량비 m=0.5



신설S조의 최대응답변위저감율 sRd (%)

(b) 주기비 T=0.5, 질량비 m=1.0



신설S조의 최대응답변위저감율 sRd (%)

(c) 주기비 T=0.5, 질량비 m=1.5



신설S조의 최대응답변위저감율 sRd (%)

(d) 주기비 T=0.5, 질량비 m=2.0

그림 4.19 제진성능곡선(주기비 T=0.5, TAFT1952(EW))



신설S조의 최대응답변위저감율 sRd (%)

(a) 주기비 T=1.5, 질량비 m=0.5



⁽b) 주기비 T=1.5, 질량비 m=1.0

^{- 75 -}



신설S조의 최대응답변위저감율 sRd (%)

(c) 주기비 T=1.5, 질량비 m=1.5



신설S조의 최대응답변위저감율 sRd (%)

(d) 주기비 T=1.5, 질량비 m=2.0

그림 4.20 제진성능곡선(주기비 T=1.5, TAFT1952(EW))



신설S조의 최대응답변위저감율 sRd (%)

(a) 주기비 T=2.0, 질량비 m=0.5



신설S조의 최대응답변위저감율 sRd (%)

(b) 주기비 T=2.0, 질량비 m=1.0

- 77 -



(d) 주기비 T=2.0, 질량비 m=2.0

그림 4.21 제진성능곡선(주기비 T=2.0, TAFT1952(EW))

신설 S조의 고유주기가 기존 RC조의 고유주기에 비해 짧은 경우(Ts/Tmc=0.25, 0.5), 기존 RC조의 변위는 연결강성배율 α(Kd/Kmc)에 상관없이 항복내력비 β(Qd/Qmc)값이 커질수록 응답변위저감율이 증가하나 신설 S조는 반대로 응답변위저감율이 감소하였 다. 그리고 주기비가 일정할 경우 질량비가 증가할수록 신설 S조의 응답변위저감율은 점점 증가하나 기존 RC조의 응답변위저감율은 일정함을 알 수 있다.

ex) EL-Centro1940(NS) : 질량비(Ms/MRc) 증가에 따른 기존 RC조의 응답변위저감율은 주기비 0.25일 경우 20~75%로 일정, 주기비 0.5일 경우 15~60%로 일정하였다.

신설 S조의 고유주기가 기존 RC조의 고유주기에 비해 긴 경우(Ts/Trc=1.5, 2.0), 기 존 RC조의 응답변위는 연결강성배율 α(Kd/Krc)에 상관없이 항복내력비 β(Qd/Qrc)값이 커질수록 응답변위저감율이 감소하나 신설 S조의 응답변위저감율은 증가하였다. 그리 고 주기비가 일정할 경우 질량비가 증가할수록 신설 S조, 기존 RC조 모두 응답변위저 감율이 감소하였다.

그리고 질량비가 일정할 경우 주기비가 커질수록 신설 S조의 응답변위저감율은 증가 하나 기존 RC조의 응답변위저감율은 감소하였다. 입력지진파에 의한 영향을 보면 전체 적인 경향은 위의 내용과 대체로 일치하고 있음을 알 수 있다.

이상의 결과를 주기비, 질량비, 입력지진파별로 신설 S조, 기존 RC조의 변위에 미치 는 영향은 표 4.1과 같다.



	주기비 (Ts/Trc)	0.25			0.5				1.5			2.0					
	질량비 (Ms/Mac)	0.5	1.0	1.5	2.0	0.5	1.0	1.5	2.0	0.5	1.0	1.5	2.0	0.5	1.0	1.5	2.0
신설S조	ELC	Not Good			Partially Good				Good			Good					
	JMA	Not Good				Partially Good				Good				Good			
	Tohoku	Not Good				Partially Good				Good			Good				
	TAFT	Not Good			Partially Good				Partially Good			Good					
기존RC조	ELC	Good				Good				Not Good				Partially Good			
	JMA	Good				Good				Not Good			Not Good				
	Tohoku	Good				Good				Partially Good				Partially Good			
	TAFT	Good				Good				Partially Good				Partially Good			

※ Not good : 응답변위저감율(-) -> 응답변위증가
Partially Good : 부분적으로 응답변위감소
Good : 응답변위저감율(+) -> 응답변위감소

표 4.1 해석결과

표 4.1을 통해 주기비 0.25의 경우 신설 S조는 질량비, 입력지진파에 관계없이 전체 영역에서 응답변위가 증가하지만 기존 RC조는 전체영역에서 응답변위가 감소함을 알 수 있다. 주기비 0.5의 경우 신설 S조는 부분적으로 응답변위가 감소하고 기존 RC조는 전체영역에서 응답변위가 감소하였다. 주기비 1.5의 경우 신설 S조는 대체로 전체영역 에서 응답변위가 감소하지만 기존 RC조는 지진파에 따라 대체로 응답변위가 증가하였 다. 주기비 2.0의 경우 신설 S조는 전체영역에서 응답변위가 감소하지만 기존 RC조는 대체로 부분적으로 응답변위가 감소함을 알 수 있다.

전체적인 경향으로는 신설 S조는 주기비가 증가할수록 응답변위가 감소하고, 반대로 기존 RC조는 주기비가 작아질수록 응답변위가 감소함을 알 수 있다(그림4.10). 즉, 두 건축물을 연결하였을 경우 고유주기가 긴 건축물의 변위가 감소함을 알 수 있다. 이는 고유주기가 다른 두 구조물을 연결할 때, 양쪽의 고유주기가 각각의 중간 값에 가까워 지려 하기 때문이다. 따라서 고유주기가 큰 것은 작아지려 하고, 작은 것은 커지려고 하는 경향을 나타내었다. 따라서 고유주기가 긴 건축물의 변위가 감소함을 알 수 있 다.

따라서, 표 4.1에 나타낸바와 같이 주기비 0.25의 경우 기존 RC조의 응답변위는 감 소하나 신설 S조의 응답변위는 증가하였다. 또한, 주기비 1.5, 2.0의 경우에서 기존 RC조의 응답변위가 오히려 증가하기 때문에 연결제진에 의한 응답변위 감소효과는 나 타나지 않았다. 따라서 기존 RC조와 신설 S조의 응답변위를 동시에 감소시키는 주기비 는 0.5의 경우로 나타났다. 더욱이, 주기비 0.5의 경우 신설 S조의 응답변위가 부분적 으로 감소하기 때문에 각 질량비별로 마찰댐퍼의 최적 특성지표(연결강성배율 α와 항 복내력비 β)를 얻는 것이 중요하다.

그림 4.23은 각 입력지진파별로 주기비가 0.5 일 때, 기존 RC조 및 신설 S조의 응답 변위저감율이 가장 크게 나타난 질량비 2.0의 연결제진곡선에서 연결강성배율 α (Kd/KRc)와 항복내력비 β(Qd/QRc)를 고려하여 응답변위저감율이 가장 큰 범위와 그때 의 마찰댐퍼의 항복내력 값(Qd)을 표시하였다.







그림 4.23(b) 제진성능곡선(JMA Kobe1995(NS)),T=0.5,m=2.0

- 82 -



그림 4.23(c) 제진성능곡선(TOHOKU UNIV.1978(NS)),T=0.5,m=2.0



그림 4.23(d) 제진성능곡선(TAFT1952(EW)),T=0.5,m=2.0

- 83 -

그림 4.23을 보면 각 입력지진파별로 차이는 있지만 일반적으로 연결강성배율 α (Kd/KRc)가 2.5~3.5, 항복내력비 β(Qd/QRc)가 0.184~0.23(Qd=100~150kN) 일 경우 기존 RC조는 50~70%, 신설 S조는 20~40%의 응답변위저감율을 나타내었다.

(3) 가속도저감율

$$R_a = (A_{non} - A_{connect})/A_{non} \times 100$$
 (4.2)

 R_a
 : 최대가속도저감율(%)

 A_{non}
 : 비연결시 최대가속도

 A_{non}
 : 연결시 최대가속도

그림 4.24에 각 입력지진파별로 주기비 0.5, 질량비 2.0 경우의 기존 RC조와 신설 S 조의 최대가속도저감율에 따른 제진성능곡선을 나타내었다. 또한, 연결강성배율 α (Kd/KRc)와 항복내력비 β(Qd/QRc)를 고려하여 가속도저감율이 가장 큰 범위와 그때의 마찰댐퍼의 항복내력(Qd)을 동시에 표시하였다.

그림 4.24에서 보는바와 같이, 입력지진파에 따른 가속도저감율의 차이는 있지만 일 반적으로 연결강성배율 α(Kd/KRc)가 2.5~3.5, 항복내력비 β(Qd/QRc)가 0.092~0.276 (Qd=50~150kN)일 때 기존 RC조는 30~70%, 신설 S조는 20~50%의 가속도저감율을 나타내 었다. 가속도저감율은 응답변위저감율과 비슷한 결과를 나타내었다.

또한, 각 입력지진파별로 주기비 0.5, 질량비 2.0 일 때, 기존 RC조의 최대가속도저 감율과 최대응답변위저감율의 관계를 그림 4.25에 나타내었다. 입력지진파별로 가속도 저감율과 응답변위저감율의 차이는 있지만 제진성능곡선을 통해 각 가속도저감율에 따 른 연결강성배율 α(Kd/KRc)와 항복내력비 β(Qd/QRc)를 결정함으로서 응답변위저감율 을 예측할 수 있다.



신설S조의 최대가속도저감율 sRa(%)





그림 4.24(b) 제진성능곡선-가속도(JMA Kobe1995(NS)), T=0.5,m=2.0

- 85 -



그림 4.24(c) 제진성능곡선-가속도(TOHOKU UNIV.1978(NS)), T=0.5,m=2.0



그림 4.24(d) 제진성능곡선-가속도(TAFT1952(EW)), T=0.5,m=2.0

- 86 -



기존RC조의 최대가속도저감율 RcRa(%)





그림 4.25(b) 기존RC조의 제진성능곡선(JMA Kobe1995(NS)), T=0.5,m=2.0

- 87 -



그림 4.25(c) 기존RC조의 제진성능곡선(TOHOKU UNIV.1978(NS)), T=0.5,m=2.0



기존RC조의 최대가속도저감율 RCRa (%)

그림 4.25(d) 기존RC조의 제진성능곡선(TAFT1952(EW)), T=0.5,m=2.0

본 장에서는 2개의 건축물을 마찰댐퍼로 연결한 연결제진구조물에 대한 지진응답해 석을 실시하였다. 마찰댐퍼의 복원력특성을 완전탄소성형으로 설정하여 2개의 건축물 의 조합(주기비, 질량비), 입력지진파의 영향을 검토하였다. 그리고 마찰댐퍼의 특성 지표(연결강성배율 α, 항복내력비 β)를 결정하는 방법으로 제진성능곡선을 적용하였 다. 제진성능곡선을 통한 마찰댐퍼의 특성지표에 근거하여 연결제진구조물에 마찰댐퍼 를 효율적으로 사용할 수 있다.

① 두 건축물을 연결하였을 경우 고유주기가 긴 건축물의 변위가 감소하는 경향을 나 타낸다.

마찰댐퍼로 연결한 주기비 T(Ts/Tmc), 질량비 m(ms/mmc)가 다른 두 건축물의 연결제진 시에 주기비에 따른 결과는 질량비, 입력지진파의 영향에 관계없이 고유주기가 긴 건 축물의 응답변위가 감소하였다. 이는 고유주기가 다른 두 건축물을 연결할 때, 양쪽의 고유주기가 각각의 중간 값에 가까워지려는 경향을 가지며 고유주기가 긴 건축물의 응 답변위가 감소하였다.

② 신설 S조의 고유주기가 기존 RC조의 고유주기에 비해 짧은 경우(Ts/Tnc=0.25, 0.5)

기존 RC조의 응답변위는 연결강성배율 α(Kd/KRc)에 상관없이 항복내력비 β(Qd/QRc) 값이 커질수록 응답변위저감율이 증가하나 신설 S조는 반대로 응답변위저감율이 감소 하였다. 그리고 주기비(Ts/TRc)가 일정할 경우 질량비(ms/mRc)가 증가할수록 신설 S조의 응답변위저감율은 점점 증가하나 기존 RC조의 응답변위저감율은 일정함을 알 수 있다. ex) EL-Centro1940(NS) : 질량비(ms/mRc) 증가에 따른 기존 RC조의 응답변위저감율은 주기비 0.25일 경우 20~75%로 일정, 주기비 0.5일 경우 15~60%로 일정하였다.

③ 신설 S조의 고유주기가 기존 RC조의 고유주기에 비해 긴 경우(Ts/Tnc=1.5, 2.0)

기존 RC조의 응답변위는 연결강성배율 α(Kd/Kmc)에 상관없이 항복내력비 β(Qd/Qmc) 값이 커질수록 응답변위저감율이 감소하나 신설 S조의 응답변위저감율은 증가하였다. 그리고 주기비(Ts/Tmc)가 일정할 경우 질량비(ms/mmc)가 증가할수록 신설 S조, 기존 RC 조 모두 응답변위저감율이 감소하였다.

④ 마찰댐퍼의 특성지표(연결강성배율 α, 항복내력비 β)는 건축물의 조합(주기, 질 량비), 입력지진파의 영향에 따라 제진의 최적범위가 다르다.

각 경우에 따라 제진성능곡선을 작성하여 응답변위저감율, 가속도저감율이 가장 큰 부분에서 연결강성배율 α(Kd/Kmc)와 항복내력비 β(Qd/Qmc)를 결정함으로서 최적의 마 찰댐퍼량을 구할 수 있다.

제5장 Sub-structure Online Test

5.1 Sub-structure online 지진응답실험의 개요

Sub-structure online 지진응답실험 시스템은 구조물의 모델링에 의한 수치 해석 결 과의 타당성을 실험적으로 평가할 수 있는 시스템이다. 특히 구조물의 일부는 재하실 험을 통하여 실제의 복원력 특성을 파악하면서 나머지 부분은 컴퓨터 내에서 가상의 해석 모델로 구성함으로서 해석과 실험을 동시에 실시하는 시스템을 sub-structure online 실험 시스템이라고 부른다. 이것은 해석 대상이 되는 구조물의 구성요소 중에 서 비선형성 등으로 인해 불확정성을 포함하고 있는 부분은 직접 실험을 통하여 구조 적 특성을 파악하고 구조물의 나머지 부분은 수치 모델로서 계산하여 양자를 컴퓨터 내에서 결합시켜 구조물 전체의 지진 응답 해석을 실행해 나가는 것이다. 본 장에서는 제3장에서 해석한 시뮬레이션 모델에 대해서 실제로 서브-온라인 지진 응답 실험을 실 시하여 연결제진구조물에 대해 sub-structure 온라인 지진응답실험의 적용가능성에 대 해서 연구한다.

5.2 연결제진구조물의 모델화

실험 대상이 되는 연결제진구조물의 모델은 그림 5.1에 나타내었다. Sub-structure online 실험의 개념도를 그림 5.2에 나타내었다. 본 논문에서는 마찰댐퍼 부분은 실 재하구조공간으로 하고 기존 RC조와 신설 S조의 부분을 가상부분구조 공간으로 하는 하이브리드 해석을 실시하였다

기존 RC조·신설 S조를 1 질점 전단 탄성 모델로 하여, 가상부분 구조공간으로서 컴 퓨터 내에서 모델화하였다. 연결부의 마찰댐퍼에 대해서, 가상 부분의 수치계산과 병 행한 재하실험을 실시하는 것으로 Sub-structure 온라인 실험을 구성하였다.



그림5.1 연결제진구조물의 모델화



그림5.2 Sub-structure online 실험의 개념도

- 92 -



그림 5.3 온라인 지진응답실험의 흐름과정

- 93 -

5.3 연결제진구조물의 Online 지진응답실험

제3장에서는 마찰댐퍼의 복원력 특성을 완전탄소성형 모델로서 연결제진구조물의 응 답 해석을 실시했다. 본 장에서는 마찰댐퍼의 복원력 특성을 제3장에서 정의한 완전탄 소성형 모델로 치환한 시뮬레이션 모델을 설정해 해석을 실시하여 부분구조 온라인 실 험과 검토하였다.

5.3.1 시뮬레이션(Simulation) 모델의 설정

제4장으로 언급한 바와 같이 연결제진구조물의 제진성능은, 각 구조물의 구성이나 구조물의 고유 주기비 및 질량비에 따라서 그 성능이 다르기 때문에 마찰댐퍼의 설정 파라미터 또한 각 경우에 따라 적절히 결정되지 않으면 안된다.

Test	T _S /T _{RC}	Ts	T _{RC}	W _{RC} (kN)	W₅(kN)	미왕대피 부드	입력지진파			
Code	ms/m _{RC}	(sec)	(sec)	K _{RC} (kN/cm)	K₅ (kN/cm)	마칠펌퍼 들드 도입장력 (kN)	기준화 최대 가속지진동	입력 시간		
4	0.5	0.10	0.38	490	735	100	Elcentro(NS)			
Ι	1.5	0.19		136.6	819.3	120	200gal	20sec		
	0.5	0.10	0.38	490	735	100	Elcentro(NS)			
2	1.5	0.19		136.6	819.3	1 120	200gal	20sec		

표 5.1 시뮬레이션 모델의 설정

입력지진파형은 1940년 Imperial Valley 지진의 El-Centro(NS)파로 가속도를 200cm/sec²에 기준화한 것을 이용한다. 본 논문에서는 마찰댐퍼의 초기내력 상승이 지 진발생시 전 과정에 대해서, 연결제진구조물에 미치는 영향을 파악하기 위해서 online 실험을 실시하였다. 또한 초기내력 상승효과를 제거하기 위해서 마찰재의 표면을 안정 화시킨 후 online 실험을 실시하여 두 실험결과를 비교 검토하였다.

5.3.2 온라인해석 결과

그림 5.4~12는 Test Code-1,2의 실험결과를 나타내고 있다. 마찰댐퍼에 도입된 볼트 장력은 120kN을 사용하였다. Test Code-1에서는 실험개시부터 2.5초 이내(즉, 마찰댐

- 94 -
퍼의 누적 변위는 15㎝정도가 된다) 댐퍼의 미끄럼내력의 실험치는 160kN부터 신속히 100kN까지 저하하여 안정미끄럼내력 상태로 마찰하였다. 미끄럼내력 실험결과와 해석 결과 값(98.8kN)을 비교해 보면, 실험의 최초의 1초 이내에서는 실험결과는 해석결과 보다 크게 나타나고 있으나 재하실험 실시 후 양쪽이 점점 일치하는 것을 알 수 있다. 반면에, 신설S조와 기존RC조의 변위 시간이력의 실험값과 해석값은 실험개시부터 종료 시까지 일치하고 있음을 확인하였다.

Test Code-2에서는 실험의 최초의 1초 이내에 마찰댐퍼의 미끄럼 내력 실험값은 해 석 값보다 다소 높게 나타났으나 그 이후에는 미끄럼 내력 실험값과 해석 값은 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. 실험 종료 시까지 댐퍼의 미끄럼내력은 103kN을 유지하 며 안정 상태로 마찰 거동하였다.

Test Code-1과 Test Code-2의 실험결과로부터 마찰댐퍼의 초기 내력상승 및 안정미 끄럼내력시까지의 저하의 영향은 전체 연결제진구조물에 미치는 영향은 경미하여 완전 탄소성모델로 모델화하여 사용가능함을 확인하였다.



- (a) 하중-변형 관계
- (b) 기존RC조 변위시간이력응답



- (c) 마찰댐퍼 변위시간이력응답 (d) 신설S조 변위시간이력응답



(e) 기존RC조 변위시간이력응답 (f) 기존RC조 가속도시간이력응답 (비연결과 비교)

(g) 신설S조 변위시간이력응답 (h) 신설S조 가속도시간이력응답 (비연결과 비교)

(비연결과 비교)

(비연결과 비교)

그림 5.4 Online 실험결과(Test Code-1)



- (a) 하중-변형 관계
- (b) 기존RC조 변위시간이력응답



(c) 마찰댐퍼 변위시간이력응답 (d) 신설S조 변위시간이력응답



(e) 기존RC조 변위시간이력응답 (f) 기존RC조 가속도시간이력응답 (비연결과 비교)

(비연결과 비교)



(g) 신설S조 변위시간이력응답 (h) 신설S조 가속도시간이력응답 (비연결과 비교)

(비연결과 비교)

그림 5.4 Online 실험결과(Test Code-2)

제6장 결론

학교건축물의 내진리뉴얼을 위하여 마찰댐퍼를 이용하여 인접한 두 건축물의 변위응 답차이에 근거하는 연결제진시스템을 제안하고 내진성능을 파악하였다. 그 결과 다음 과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 준정적 하중 하에서 마찰댐퍼의 역학적 특성을 파악하는 것을 목적으로 5종류의 입 력파형에 대한 반복재하실험을 실시하여, 마찰댐퍼의 볼트 도입장력의 차이에 따른 미끄럼내력, 미끄럼계수, 볼트의 도입장력의 거동에 대하여 연구하였다. 마찰댐퍼의 복원력 특성 모델로서 완전탄소성모델을 이용하여 매우 정밀하게 이력 거동을 나타 내었다. 다만, 미끄럼내력 유지율의 최대값은 76.3%, 최저값은 59.4%이며 각 경우의 평균값는 66.3%로 미끄럼내력 감소의 영향을 고려할 필요가 있다.
- 2. 마찰댐퍼를 이용하여 두 건축물을 연결했을 경우 연결강성배율 α(Kd/Kmc), 항복내 력비 β(Qd/Qmc)에 따른 기존 RC조 건축물의 최대응답변위저감율을 세로축으로 하 고, 신설 S조 건축물의 최대응답변위저감율을 가로축으로 하는 연결제진구조물의 제 진성능곡선을 작성하였다.

4개의 입력지진파에 따른 다양한 건축물의 조합을 설정하여 각각의 경우에 대해 제 진성능곡선을 작성한 결과, 연결강성배율 α(Kd/KRc)가 2.5~3.5, 항복내력비 β (Qd/QRc)가 0.184~0.23(Qd=100~150kN) 일 경우 기존 RC조는 50~70%, 신설 S조는 20~40%의 응답변위저감율을 나타내었다.

3. 시뮬레이션 모델에 대해 sub-structure online 지진 응답 실험을 실시하여 연결제 진구조물에 대해 sub-structure online 지진응답실험의 적용가능성에 대해서 연구하 였다. Test Code-1과 Test Code-2의 실험결과로부터 마찰댐퍼의 초기 내력상승 및 안정미끄럼내력시까지 저하가 전체 연결제진구조물에 미치는 영향은 1% 이하로 경미 하였다.

참고문헌

- 1) 박지형, 박태원, 김욱종, 이도범, 강재 이력댐퍼의 특성과 댐퍼적용효과 평가기법 에 관한 연구, 대한건축학회논문집, 제26권 제1호, pp33~36, 2006
- 2) 이승재, 스터드형 진동제어 강재댐퍼가 장착된 3층 강구조 골조의 강제진동실험에 관한 연구, 한국공간구조학회논문집, Vol.6, No.2, pp115~121, 2006
- 이명호, 문태섭, 반복하중을 받는 강판 전단패널의 거동에 관한 실험적 연구, 대한 건축학회논문집, 제21권 11호, pp95~102, 2005
- 4) 오상훈, 고항복비 강재를 이용한 내진구조시스템의 내진성능, 한국지진공학회 2005
 년도 학술대회논문집, pp211~219, 2005
- 5) Y.L.Xu, Q.He, J.M.Ko, Dynamic response of damper-connected adjacent building under earthquake excitation, Engineering Structures 21, pp135~148, 1999
- 6) W.S.Zhang, Y.L.Xu, Vibration analysis of two buildings linked by Maxwell model-defined fluid damper, Journal of Sound and Vibration 233, pp775~796, 2000
- 7) A.V.Bhaskararao, R.S.Jangid, Seismic analysis of structure connected with friction dampers, Engineering Structure 28, pp690~703, 2006
- A.V.Bhaskararao, R.S.Jangid, Harmonic response of adjacent structures connected with a friction damper, Journal ofSound and Vibration 292, pp710~725, 2006
- 9) C.L.Ng, Y.L.Xu, Semi-active control of a building complex with variable friction damper, Engineering Structures 29, pp1209~1225, 2007
- 10) 岩浪孝一・鈴木浩平・背戸一登:「並列構造物の制振法に関する研究(P,T,Q定点理論 による方法)」日本機械学会論文集、C編、Vol.52、No.484、pp.3063~3072、1986
- 11) 蔭山滿・安井譲・深野慶:「複合構造物の制振に関する研究(その1バネとダンパーで 連結する場合の最適化について)」日本建築学会大会学術講演梗概論文集、

pp.725~726、1993

- 12) 岩田範生・曾田五月也:「粘性ダンパーによる建物郡の制振に関する研究」日本建築 学会大会学術講演梗概論文集、pp.653~654、1993
- 13) 高橋愛・中埜良昭・真田靖士:「一体化された建物の連結部の必要耐力の評価方法」 第11回日本地震工学シンポジウム、pp.2027~2030、2002
- 14) 飯田知美・長岡寛之・瀧下良一・崔宰赫・藤谷秀雄・大井謙一「既存構造物と新設構 造物の履歴型ダンパー連結による耐震改修」日本建築学会近畿支部研究報告集、第45 号構造系pp177~180、2004
- 15)田中清,佐々木康人,米山眞一朗,鋼種が異なるせん斷型パネルダンパーの靜的履歴 特性に關する實驗研究,日本建築学会構造系論文集,第520號,pp117~124,1999
- 16) 履歴型ダンパー付骨組の地震応答性状と耐震設計法、社団法人日本鋼構造協会・社団 法人鋼材倶楽部、1998年
- 17) 岩浪孝一・鈴木浩平・背戸一登:「ダンパーとばねで連結された並列構造物の制振法
 日本機械学会論文集、C編、Vol.59、No.566、pp.2975~2980、1993
- 18) 蔭山滿・吉田治:「連結構造物の最適制振に関する研究(その6主構造体の制振を第一義とした場合の性能・検討)」日本建築学会大会学術講演梗概論文集、pp.845~846、
 1996
- 19) 木村一成・塩原等・田尻清太郎:「付加構造物の動的特性を利用したセミアクティブ 制御によるRC構造物の地震応答低減効果」日本建築学会大会学術講演梗概論文集、 pp.895~896、2005
- 20) 吉岡智和:「高力ボルト摩擦すべり接合に関する研究その1アルミニウム合金板を摺 動材に利用した接合要素実験」、日本建築学会構造系論文集、No.573、pp.217~222、 2003
- 21) 吉岡智和:「高力ボルト摩擦すべり接合に関する研究その2銅合金板を摺動材に利用 した接合要素実験」、日本建築学会構造系論文集、No.573、pp.119~123、2004



1. 마찰댐퍼 실험 사진



사진 1. 마찰댐퍼 실험 전경



사진 2. 실험체 측정 장치 전경

- 103 -



사진 3. 마찰댐퍼 실험체



사진 4. 실험체 T형 웨브

- 104 -



사진 5. 실험 후 마찰표면 상태(알루미늄)



사진 6. 실험 후 마찰표면 상태(SS400)

2. 추가해석 데이터

해석 매개변수	범위		
고유주기비 T (T _S /T _{RC})	0.5		
질량비 m (m _S /m _{RC})	2.0		
연결강성배율 α (k _d /k _{RC})	0.5~5 (0.5간격)		
항복내력비 β (Q _d /Q _{RC})	0.046~9.246 (Q _d =25~5125kN)		
입력지진파	EL-Centro1940(NS) - 200gal		

관점 1) 연결강성배율 α가 1미만(0.5) 일 때의 저감 경향

2) 항복내력비 β가 9.246까지(강접) 증가할 경우의 두 구조물의 응답



그림 1. 제진성능곡선-변위저감율(주기비 T=0.5, 질량비 m=2.0)

- 106 -



그림 2. 제진성능곡선-가속도저감율(주기비 T=0.5, 질량비 m=2.0)



그림 3. 제진성능곡선-변위저감율(주기비 T=0.5, 질량비 m=2.0)

감사의 글

"여호와는 나의 목자시니 내가 부족함이 없으리로다" (시편 23:1)

학부 졸업을 앞두고 진로선택으로 고민하던 제게 연구원으로서의 길을 보여주시며 할수있다는 믿음을 주신 최재혁교수님을 통해 제 인생의 방향과 목표를 갖게 되었습니 다. 부족한 저에게 가족과 같은 편안함과 따뜻함으로 대하여 주시고 학문에 대한 열정 으로 이끌어주셨습니다. 논문을 마무리하기까지 세심한 배려와 엄한 지도로 학문의 길 을 열어주신 최재혁교수님께 깊은 존경과 감사를 드립니다.

또한, 충실한 논문이 될 수 있도록 세심한 지적과 조언으로 각별히 심사를 해주신 위원장 양영성교수님과 김정섭교수님, 항상 밝은 미소로 많은 가르침을 주신 김수인교 수님, 이청웅교수님, 조용준교수님, 박광철교수님, 임만택교수님, 김의식교수님, 장동 국교수님, 김인호교수님, 염대봉교수님께 깊이 감사드립니다.

언제나 따뜻하게 사랑으로 저를 감싸주시는 할머니, 대학원이란 길을 택한 제게 힘 과 용기를 주시며 언제나 믿어주시는 아버지, 항상 사랑으로 저를 바라보며 걱정해주 시는 어머니, 친구 같은 상담자인 수지누나, 말성꾸러기 내 동생 민수에게 감사의 마 음을 전합니다. 그리고 언제나 든든하고 착한 후배 상진이, 언제나 함께할 소리개, 대 학원 생활 동안 함께 하며 많은 관심과 도움을 준 대학원 선배님, 학부 후배님, 아낌 없는 조언을 해준 신희, 큰 기쁨을 주는 종진, 현주, 끝으로 내진공학·구조동역학연 구실 연구원 모두에게 감사드립니다.

이제 하나의 계단을 올라섰습니다. 아직도 올라갈 계단이 많이 남아있습니다. 저를 아껴주시고 사랑주시는 모든 분들께 감사의 인사를 드리며, 이제 또 하나의 계단을 오 르기 위해 열심히 노력하겠습니다.

> 2008년 12월 김현수 올림

저작물 이용 허락서						
학 과	건축공학과	학 번	20077067	과 정	석사	
성명	한글:김현수 한문:金賢洙 영문:Kim Hyun Soo					
주 소 전라남도 여수시 광무동 969-16						
연락처 E-MAIL : duft4u@hanmail.net						
한글 : 이력댐퍼를 이용한 연결제진(連結制振)구조물의 지진응답특성 논문제목 영어 : Seismic Performance of Interaction Vibration Control System using Hysteresis Damper						
본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건 아래 조선대학교가 저작물을 이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.						
- 다 음 -						
 저작물의 08구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복제, 기억장치에의 저장, 전송 등을 허락함. 위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집과 형식상의 변경을 허락함. 다만, 저작물의 내용변경은 금지함. 배포·전송된 저작물의 영리적 목적을 위한 복제, 저장, 전송 등은 금지함. 저작물에 대한 이용기간은 5년으로 하고, 기간종료 3개월 이내에 별도의 의사 표시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함. 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함. 조선대학교는 저작물 이용의 허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음. 소속 대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송·출력을 허락함. 						
동의여부 : 동의(〇) 반대()						
2009년 2월						
저작자: 김 현 수 (인)						
조선대학교 총장 귀하						