

말뚝두부보강의 면진 댐퍼시설 개발

**Development facility of pile head using isolate
damper**

주관연구기관

(주)제일엔지니어링종합건축사사무소

공동연구기관

유니슨이앤씨(주)

국 토 해 양 부

제 출 문

국토해양부장관(한국건설교통기술평가원장) 귀하

이 보고서를 건설기술혁신사업 "말뚝두부보강의 먼진 댐퍼시설 개발에 관한 연구"과제의 최종(연차) 보고서(안)로 제출합니다.

2006. 06. 30

주관연구기관명 : (주)제일엔지니어링종합건축사사무소

주관연구책임자 : 임 형 주

연 구 원 : 박 정 일

연 구 원 : 유 중 문

연 구 원 : 김 형 오

연 구 원 : 윤 광 중

연 구 원 : 양 요 섭

공동연구기관명 : 유니슨이앤씨(주)

공동연구책임자 : 박 건 록

연 구 원 : 오 주

연 구 원 : 박 진 영

연 구 원 : 이 완 하

연 구 원 : 김 기 만

연 구 원 : 이 재 욱

보고서 요약서

과제고유번호	09기술혁신 D2	해 당 단 계 연 구 기 간	2009.10.26~ 2010.06.25	단 계 구 분	1/1
연 구 사 업 명	중 사 업 명	건설기술혁신사업			
	세부사업명				
연 구 과 제 명	대 과 제 명	말뚝두부보강의 면진 댐퍼시설 개발			
	세부과제명				
연 구 책 임 자	임 형 주	해당단계 참 여 연구원수	총 : 12명 내부 : 12명 외부 : 0명	해당단계 연 구 비	정부 : 5,000천원 기업 : 157,000천원 계 : 207,000천원
		총연구기간 참 여 연구원수	총 : 12명 내부 : 12명 외부 : 0명	총연구비	정부 : 5,000천원 기업 : 157,000천원 계 : 207,000천원
연구기관명 및 소 속 부 서 명	(주)제일엔지니어링 종합건축사사무소		참여기업명	유니슨이앤씨(주)	
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
위 탁 연 구	연구기관명 :		연구책임자 :		
요 약				보고서면수	136
본 연구는 말뚝두부 보강에 적합한 면진댐퍼장치를 개발하는데 목적이 있다. 이를 위하여 면진댐퍼장치의 설계 및 성능시험기법을 개발하고, 설계 및 시공지침을 개발하고자 하였다. 또한 개발된 면진댐퍼장치에 대한 실용화 가능성을 분석하고 신규 교량 및 건축구조물의 기초 설계시 설계반영하고 현장에 시험 시공할 수 있는 기반을 구축하고자 하였다. 따라서 말뚝 두부의 면진 보강이 지진시 구조물에 미치는 영향에 대한 연구를 위하여 크게 힌지 구조계 연구 및 전단 스프링 연구를 중점으로 강사자형교 힌지 거동 연구, PSC 빔교 힌지 거동, 건축물 힌지 거동, 지중 박스 구조물 해석 및 말뚝 두부 경계조건 변화시 검토 등 지진 발생시 구조물에 대한 영향을 말뚝 면진시와 비면진시로 구분하여 구조해석 실시 및 연구 등을 통하여 본 연구인 말뚝 두부에 면진 보강이 지진발생시 구조물에 미치는 영향이 우수함을 알 수 있었다.					
색 인 어	한 글	면진댐퍼, 말뚝두부보강, 힌지연결, 전단스프링, 내구성			
	영 어	Isolate Damper, The Reinforced of head of pile, Hinge type connection, Shear spring, Durability			

요 약 문

I. 제 목

말뚝두부보강의 면진 댐퍼시설 개발

II. 연구개발의 목적

말뚝 두부보강의 면진 댐퍼시설 연구개발의 경우 지진하중을 구조물 기초에서 일차적으로 지진하중을 감소시키는 것과 다르게 일반적인 면진은 구조물에 기둥 또는 기둥의 상부 받침부에 설치되는 면진시설로 지진하중을 구조물의 면진시설로 지진하중을 절감시켜 구조물 안전성 확보에 있다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

본 연구의 목표는 말뚝두부 보강에 적합한 면진댐퍼장치를 개발하는데 목적이 있음. 이를 위하여 면진댐퍼장치의 설계 및 성능시험기법을 개발하고, 설계 및 시공지침을 개발하고자 함. 또한 개발된 면진댐퍼장치에 대한 실용화 가능성을 분석하고 신규 교량 및 건축구조물의 기초 설계시 설계반영하고 현장에 시험 시공할 수 있는 기반을 구축하고자 하였다.

IV. 연구개발의 결과

말뚝 두부의 면진 보강이 지진시 구조물에 미치는 영향에 대한 연구를 위하여 크게 힌지 구조계 연구 및 전단 스프링 연구를 중점으로 강사자형교 힌지 거동 연구, PSC 빔교 힌지 거동, 건축물 힌지 거동, 지중 박스 구조물 해석 및 말뚝 두부 경계조건 변화시 검토 등 지진 발생시 구조물에 대한 영향을 말뚝 면진시와 비면진시로 구분하여 구조해석 실시 및 연구 등을 통하여 본 연구인 말뚝 두부에 면진 보강이 지진발생시 구조물에 미치는 영향이 우수함을 알수 있었다.

V. 연구개발결과의 활용계획

본 연구 개발의 결과는 향후 국내외 면진 설계에 활용되리라 판단되며, 면진 장치에 대한 국내기술이 한층 더 높아질 것이다. 또한 이를 이용한 활발한 연구가 진행되어 말뚝기초가 사용되는 많은 구조물 등에 활용될 것이다.

SUMMARY

I. Title

Development facility of pile head using isolate damper

II. Research Objections

Objection of research and development is safety of structure.

Nowadays, The isolate facilities have decreased to earthquake load at support and column. The research and development is effectively decrease earthquake load in pile head. And The research and development secure a safety of structures

III. Research Contents

The purpose of research is develop isolate damper for reinforced pile head
So, We had established a research project isolate damper. And The isolate damper is studied to commercialization possibility. We try to draw on design in constructing bridge and buildings.

IV. Result of Research & Development

The isolate damper of research have an effect on structure. So, we had established detailing research project.

Study on hinge structural system, study on shear spring, study on behavior of hinge in steel box bridge, study on behavior of hinge in PSC beam bridge, study on behavior of hinge in building, study on analysis of underground structure, study on boundary condition of pile head.

The structure used in isolate damper of pile head conducted on study of structure.

The result of study, isolate damper for pile head is effective isolate facilities.

V. Plan for applications

The result of study, isolate damper for pile head predict isolate design of the world. It predict improvement to internal technology of isolate damper. We thought that isolate damper for pile head used in pile of many structure

CONTENTS

Chapter 1. Introduction	1
Section 1. Introduction of research	1
Section 2. Significance of research	4
Section 3. Duration and contents	10
Section 4. Objection and contents	13
Section 5. Strategy of research	17
Section 6. Strategy contents of research	18
 Chapter 2. Status of foreign and domestic techniques	19
Section 1. Domestic and foreign technology and trend	19
Section 2. Domestic technology and trend	20
Section 3. Foreign technology and trend	21
Section 4. Patent trend	25
 Chapter 3. Result and discussion	26
Section 1. Result of research	26
Section 2. Study on hinge structure system and earthquake spectrum	47
Section 3. Study on shear spring	91
Section 4. Study on Application target	104
Section 5. Economic feasibility and suitability	106
Section 6. Application of isolation	110
Section 6. Test of isolation	122

Chapter 4. Achievements and contribution	133
Section 1. Achievement graph of study	133
Section 2. Research plan	133
Chapter 5. Application	134
Section 1. Application	134
Chapter 6. Foreign science data	135
Chapter 7. Reference	136

목 차

제1장 연구개발 과제의 개요	1
제1절 핵심기술 또는 기반기술의 정의	1
제2절 연구개발 중요성	4
제3절 연구기간 및 연구내용	10
제4절 연구개발 목표 및 내용	13
제5절 연구개발 추진전략	17
제6절 연구개발 추진내용	18
제2장 국내외 기술개발 현황	19
제1절 국내외 관련 기술 및 산업동향	19
제2절 국내 기술 및 산업동향	20
제3절 국외 기술 및 산업동향	21
제4절 특허동향	25
제3장 연구개발수행 내용 및 결과	26
제1절 연구개발결과	26
제2절 구조물별 힌지구조계 및 지진응답값 연구	47
제3절 전단 스프링 연구	91
제4절 적용대상의 연구	104
제5절 타당성(경제성) 및 적합성 연구	106
제6절 지진격리장치 적용성 검토	110
제7절 지진격리장치 특성실험	122

제4장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도	133
제1절 1차년도 달성도	133
제2절 향후 연구계획	133
제5장 연구개발결과의 활용방안	134
제1절 연구개발결과의 활용방안	134
제6장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보	135
제7장 참고문헌	136

제1장 연구개발 과제의 개요

제1절 핵심기술 또는 기반기술의 정의

1. 정 의

말뚝기초 두부보강의 국내·외 현재기술은 기초와 말뚝을 강결하는 구조로 지진하중을 100% 수용하여 상부구조로 전달하고, 교량이나 건축물 기둥의 면진받침이나 브레이싱에 설치된 댐퍼 등이 지진하중을 감소시키는 작용을 함.

무조인트 교량의 현재 말뚝처리 기술은 말뚝의 강성을 약하게 하여 변위를 수용하는 구조로 지진하중의 절감효과가 있으나, 상부하중을 수용하기 위한 말뚝의 소요개수가 많을 경우 적용이 불가능한 실정임.

현재 상용되는 말뚝의 두부보강을 면진구조체로 응용 변경하여 실용화하는 연구이며, 말뚝두부보강의 댐퍼시설은 지중에서 발생하는 지진하중을 일차적으로 말뚝두부보강의 댐퍼의 연성 구조체를 일단 수용하여 기둥→받침→상부 구조 전달되는 지진하중을 일차적으로 절감시키고자 하는 것임

말뚝두부보강에 면진 댐퍼시설을 설치하여 기초에서부터 지진하중을 감소시키는 면진구조물적용은 국내뿐만 아니라 세계적으로 전무한 실태.

2. 핵심기술 또는 기반기술의 범위

본 연구의 핵심기술은 말뚝두부에 면진보강을 하여 구조물이 지진하중에 대한 안전성 확보를 제시하기 위하여 말뚝두부에서 일차적으로 지진하중을 절감하는 것임

본 연구의 기반기술의 범위는 다음과 같다.

한지 구조계 연구	한지구조(변위만 고정)로의 기초설계가 전체 구조계에 어떤 변화를 일으키는지 비교 연구
전단 스프링 계수 연구	면진 구조연구의 다음 프로세스는 전단 스프링 계수 연구 수행이며, 전단 스프링은 크게 탄성고무 또는 강재, 탄소 섬유 또는 탄소봉의 전단 스프링을 적용하여 계수값 산정
적용대상연구	말뚝 두부보강은 강관말뚝에서 설치되고 있으므로 면진 두부보강 장치는 적용이 무난하나, PHC 및 현장타설말뚝 등 콘크리트 말뚝에의 적용 연구
방수처리 등 내구성 연구	지하수위하에서 본 장치의 방식처리를 통한 내구성 확보 방안 연구

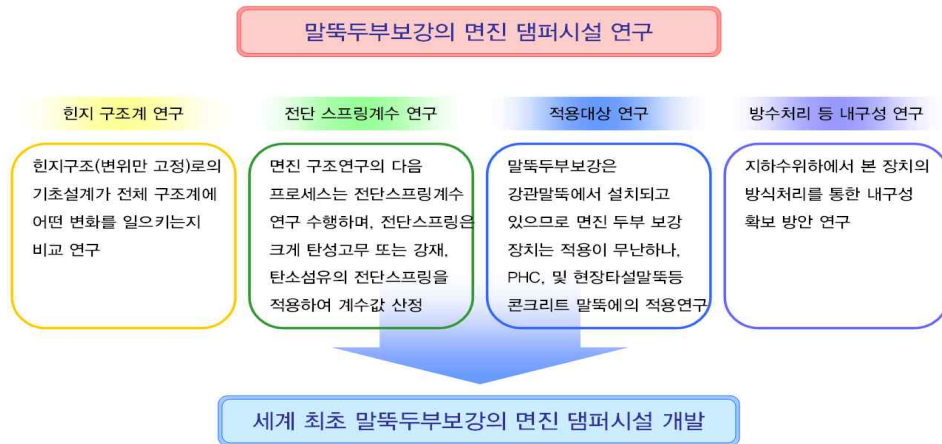


그림 1. 말뚝두부보강의 면진 댐퍼시설 개발 연구범위

3. 연구의 비전

가. 비 전

- (1) 본 과제의 연구를 통해 현재 구조물의 면진설계에 대한 특성을 분석함으로써 구조물 안전성을 위한 효과적인 면진에 대한 설계가 가능함
- (2) 이로 인해 지진하중이 발생하여도 구조물을 보다 안전하게 관리 및 운영할 수 있으며, 이는 이용자에게 향상된 서비스를 제공할 수 있음

나. 발전방향

- (1) 지진하중에 대한 구조물의 효과적인 면진설계는 향후 지진하중 발생시 구조물의 안전성을 향상시킬 수 있으며, 지진피해로부터 구조물을 유지시킬 수 있음
- (2) 앞의 비전을 달성하기 위하여 다량의 면진장치를 사용하는 것은 오히려 구조물의 안전성을 저하시켜 개인 및 사회에 인적, 물적, 사회적 손실을 초래 할 수도 있다.
- (3) 따라서 본 과제에서는 말뚝두부에 사용 가능한 효과적인 면진댐퍼 시설 연구개발을 통해 구조물의 안전성 확보를 가능하도록 함
- (4) 80년대 후반 내진설계에 대한 지침의 발간과 함께 지진에 대한 구조물 안전성 확보를 위한 내진설계가 실시되고 있다

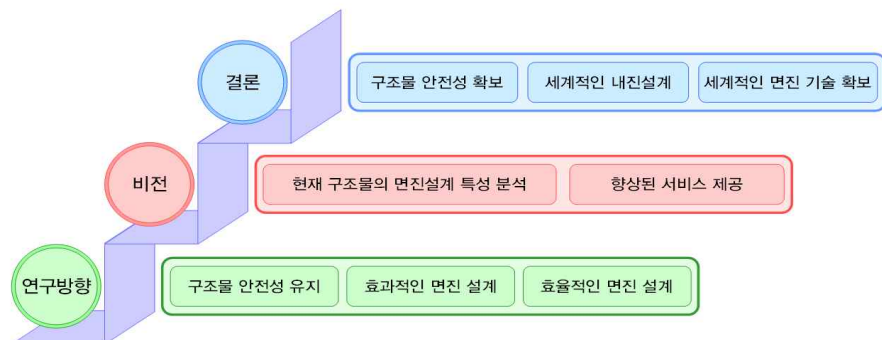


그림 2. 연구비전

4. 결 론

가. 결론적으로 말뚝두부에 사용 가능한 효과적인 면진댐퍼 시설을 연구 개발하여 면진설계 및 건설과 관련된 기본적인 기술보유국으로써 국제적으로 인정받을 것이며, 국제적인 모범이 될 수 있도록 함

5. 세부요소기술

가. 세부요소기술 간의 상관관계

- (1) 힌지 구조계 연구는 강결구조(변위 및 회전 고정)에서 힌지구조(변위만 고정)로의 기초설계가 전체구조계(건축물과 교량)에 어떤 변화를 일으키는지 비교 연구임
- (2) 전단 스프링 계수 연구는 면구조연구의 다음 프로세스는 전단스프링계수 연구 수행하며, 전단스프링은 크게 탄성고무 또는 강재, 탄소섬유의 전단스프링을 적용하는 연구임
- (3) 적용대상 연구는 말뚝두부보강은 강관말뚝에서 설치되고 있으므로 면진두부보강장치는 적용이 무난하나, PHC, 및 현장타설말뚝등 콘크리트 말뚝에의 적용연구임
- (4) 방수처리 등 내구성 연구는 지하수위하에서 본 장치의 방식처리를 통한 내구성 확보 방안 연구임

나. 세부요소기술의 비전

- (1) 본 연구과제는 말뚝두부보강 면진 댐퍼시설 개발로 장치를 사용시 전체 구조물에 발생 가능한 상황을 비교 연구, 적용대상 연구, 지하수위에 대한 장치의 내구성 확보 등 이를 통해 지진하중에 대한 구조물의 안전성을 향상 시키는데 이바지 함
- (2) 뿐만 아니라 추후 면진의 기술발전에 따른 추가 연구들 진행의 초석이 됨

제2절 연구개발 중요성

1. 기술적 측면

- 가. 지진에 대한 구조물의 안전성 확보는 경제성을 고려하지 않을 수 없고, 미관상으로도 상부로 돌출된 곳에서 면진장치 적용은 좋지 않으므로 기초라 할 수 있는 말뚝에서 지진하중을 해결하는 것이 중요함
- 나. 기존의 지진하중을 경감시키는 면진장치로는 기둥부의 받침 외에는 없으므로, 말뚝두보보강의 댐퍼 시설 등 다양한 기술을 확보하는 것은 매우 중요함
- 다. 또한 기초에서부터 지진하중을 감소시키는 면진 구조물 적용은 국내뿐 아니라 세계적으 전무하며 본 연구과제와 관련 연구는 향후 연구개발에 있어 반드시 확보해야할 중요한 기술이라 할 수 있음
- 라. 지진에 저항하도록 하도록 단면을 키우거나, 철근 강재량을 늘리는 내진이나 지진하중을 감소시키는 장치, 즉 지진하중이 감소되도록 하는 면진 설계가 반영된 구조물은 대부분 기둥이나 기둥상부 받침부에서 이루어지고 있으며, 기초에서부터 지진하중을 감소시키는 면진 구조물 적용은 전 세계적으로 전무한 실태이므로 기초라 할 수 있는 말뚝에서부터 면진적용 시스템의 연구개발이 매우 중요함
- 마. 기존의 지진하중을 경감시키는 면진장치로는 기둥부의 받침 외에는 없으므로, 말뚝두보보강의 댐퍼 시설 등 다양한 기술을 확보하는 것은 매우 중요함.
- 바. 이는 기초의 면진장치 뿐 아니라 유사분야의 구조물 적용시 구조물 영향에 대한 기초자료로 활용될 수 있으므로 기술적 측면에서 매우 중요한 연구임
- 사. 또한 국내 건설 내진분야에 있어 세계적인 경쟁력을 확보할 수 있는 계기가 될뿐 아니라 관련 연구를 통해 내진 기술의 발전에 있어 중요하기 때문임



그림 3. 지진하중 감소방법의 차이점

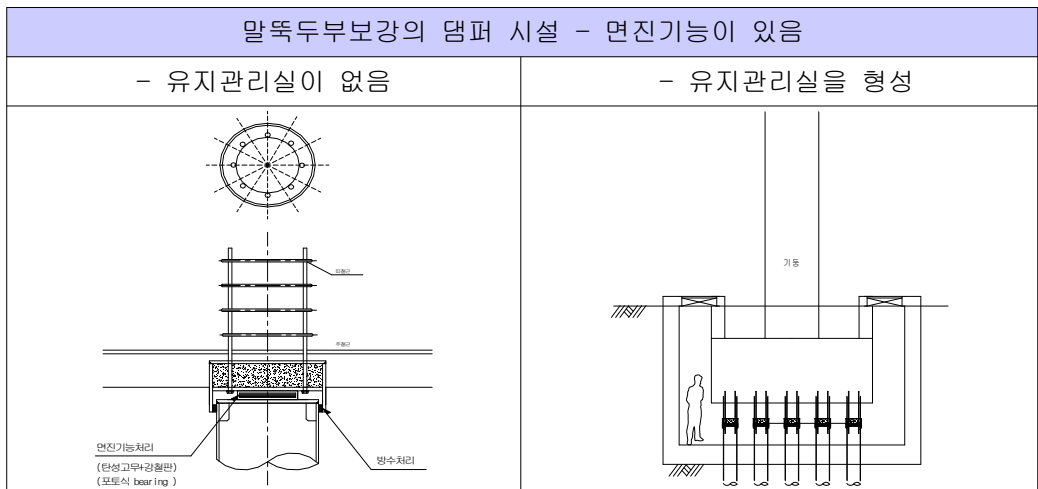
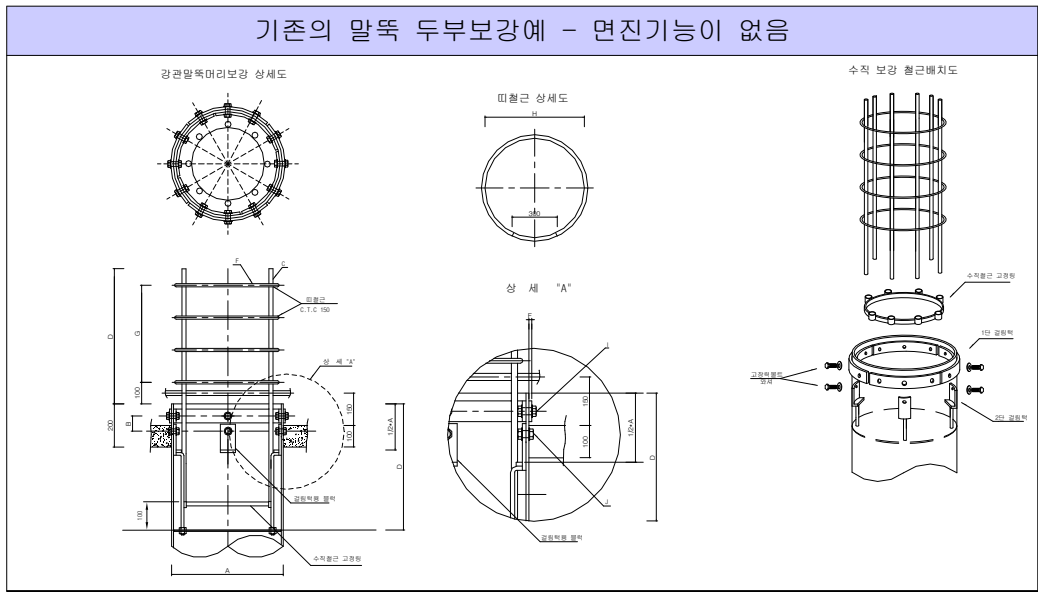


표 1. 면진시설 유무에 따른 말뚝두부보강

2. 경제 · 산업적 측면

- 가. 국내에서 말뚝 기초에 면진시설을 통한 구조물 안전성 확보 향상은 건설 산업 및 관련 산업의 경기 활성화를 유발하여 많은 고용인력을 창출하고 해외에서 관련 기술의 수출 및 해외시장으로의 진출을 가능하게 함
- 나. 최근 세계적으로 증가하는 지진피해에 대한 세계의 관심은 지진에 대한 구조물 안전성 확보이며 국내의 기술로 기초에 의한 지진하중의 일차적 감소 장치인 말뚝두부보강의 면진 댐퍼시설의 연구개발은 국제 사회에 있어 국가 이미지 제고에 효과적이며 경제적으로 해외 시장에 지식수출의 효과와 관련 산업체의 수많은 경제적 효과를 얻을 수 있으리라 생각됨
- 다. 또한, 이를 통해 지식수출의 효과와 함께 지진과 지진피해에 대한 세계적인 관심 증대로 국가적인 사회 · 경제적인 효과를 얻을 수 있다.

구조물 안전성 확보

국제 기술력 강화 및 국가 이미지 제고

경제적 / 산업적 측면

- 지식창출 및 지식수출
- 건설산업 및 관련 산업 증대
- 관련산업 세계적 경제성 증대
- 고용인력 창출
- 관련산업 호황
- 관련 연구활발

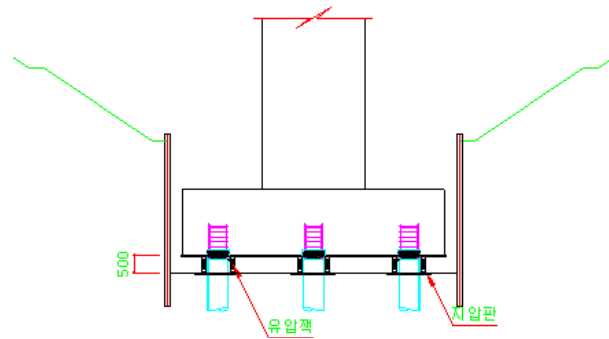
그림 4. 경제 및 산업적 측면

3. 해당기술의 타당성

가. 기존공법대비 시공 : 소구경 강관과 PHC말뚝에 말뚝두부보강의 면진시설 장착은 일반적인 말뚝두부보강이 같이 용이한 시공이 되도록 캡슐형(완전방수)으로서 본 장치를 단순히 부착하여 시공할수 있도록 발명하고자 함

기존 공법	연구과제
강관말뚝머리보강 상세도	
말뚝 상단에서 두부보강장치를 용접연결	기존공법과 같이 단순한 결합연결이 가능하도록 완전방수형태의 캡슐형 제품으로 발명

나. 유지관리 측면의 경제성 : 기초 말뚝의 보수보강공법은 현재까지 보수보강 공법은 말뚝증설외에는 별다른 방법이 없으며 지진시에도 말뚝이나 말뚝푸팅의 보강방법은 말뚝증설, 지반보강공법외에는 없는 실정임. 그러므로 본 연구과제의 공법이 적용된 기초의 경우 지진후 면진장치의 교체가 필요한 경우를 대비하여 유지관리개요도를 예시하면 다음과 같음.



다. 교체 순서 : 흙막이 시공 → 지반고결 → 유압잭설치 → 면진장치 교체

4. 해당기술의 적용 범위

가. 말뚝두부보강의 면진기술은 완전방수형으로 육상기초나 해상기초 모두에 적용이 가능하다고 판단되나 1차적으로 육상구간에 적용하고 내구성에 대한 모니터링후 하천이나 해상기초에 적용하는 것이 적절할 것으로 판단됨

나. 말뚝의 구경에 따른 적용범위를 고려할 때 상부구조물의 자중이 클수록 면진으로 인한 지진력 감소효과는 클것으로 예상되나 대구경말뚝(D=1.2m, 1.5m, 2.0m, 3.0m)의 경우 면진장치의 크기가 최대 800mm 정도이므로 크기의 차이가 발생하고, 또한 대구경에 적합한 크기의 면진장치의 경우 가격이 상승할 것으로 예상됨, 따라서 1차적으로 소구경인 강관말뚝과 PHC 말뚝 위주로 해당기술을 검토하는 것이 적절한 것으로 판단되고, 소구경말뚝의 재료중 본 연구과제에서 실험 및 시제품 제작시 용이성을 감안할 때, 강관 말뚝이 더욱 적절한 것으로 예상됨

구 분		적용성	비고
수위에 따른 구분	육상기초	◎	
	하천, 해상기초	△	모니터링후 적용
구경에 따른 구분	강관말뚝 소구경(408mm, 508mm)	◎	
	PHC말뚝 소구경(408mm, 508mm)	○	
	대구경 현장타설 말뚝 (1,200mm이상)	x	모니터링후 적용

표 2. 말뚝두부보강 면진장치의 적용범위

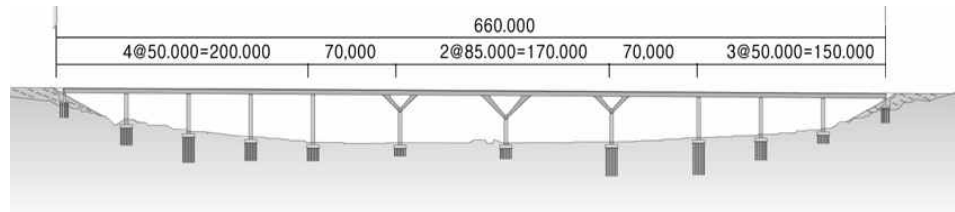
범례 : ◎ 적용이 매우 용이함 , ○ 적용이 용이
△ 모니터링후 적용이 바람직함, x 본 연구단계에서 적용 곤란

5. 해당기술의 적합성 검증

가. 말뚝기초의 SSI 해석의 경우 변위와 회전스프링기초로 할 경우 변위고정에 비해 단면력이 감소하는것은 자명한 사실이므로 이것만 보아도 본 장치는 지진하중을 경감시킴을 알수 있으며 다음은 예를 교량 농소교를 통해 검증 하였음

나. 농소교의 개요

(1) 교량형식 : V각 강합성 상형교



(2) 기초형식 : 강관말뚝(SIP공법, D508x12t)

(3) 교량받침 : 포트받침 및 스페리컬 받침 : 지진격리장치(면진장치) 사용 안함

POT600	POT1600	POT1400	POT1400	POT1600	SP2300	SP2500	SP2300	POT1600TON	POT1400TON	POT1600TON	POT600TON
POT600	POT1600	POT1400	POT1400	POT1600	SP2300	SP2500	SP2300	POT1600TON	POT1400TON	POT1600TON	POT600TON
A1	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	A2

POT	포트받침
SP	스페리컬받침
↔	전방향 가동
→	일방향 가동
●	전방향 고정

다. 고유치 및 응답치 비교 (기초하단고정과 SSI(변위수용)해석의 비교)

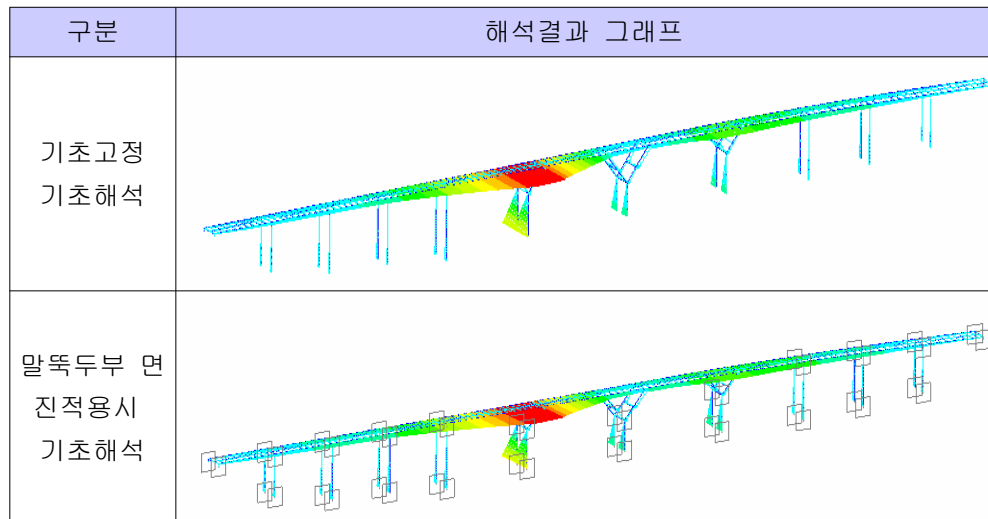
구분	응답스펙트럼해석 (기초하단고정)	SSI해석
1차모드 형상		
	SAP 2000	LUSAS
주기 및 단면력	T= 2.833 sec M= 3,945 tonf.m (일반교각부, 교축지진하중) 교대상단변위 : 93mm	T=1.837 sec M= 3,087 tonf.m (일반교각부, 교축지진하중) 교대상단변위 : 90mm
적용	내진 설계시 적용	내진해석의 안전성 검증용으로 적용

라. 말뚝두부 면진장치의 스프링계수 산정

- (1) 주경간 교각 말뚝 본수 17x10=170본, 말뚝길이 21.0m, 내부굴착 강관말뚝
- (2) 두부면진 : 탄성받침 1,000kN, $K_v(\text{연직}) = 835,000 \text{ KN/m}$, $K_h(\text{전단}) = 2,813 \text{ KN/m}$
- (3) 말뚝의 강성과 두부면진장치의 강성연결은 직렬연결로 고려

기초고정	병진,회전 고정
변위법에 기초한 한지거동 기초해석	X축 병진 $K_{xt} = 1,899,746 \text{ t/m}$ (교축) Y축 병진 $K_{yt} = 1,899,746 \text{ t/m}$ (교직) Z축 병진 $K_{zt} = 1,009,153 \text{ t/m}$ (연직) X축 회전 $K_{xr} = 18,236,209 \text{ t.m/rad}$ Y축 회전 $K_{yr} = 51,626,673 \text{ t.m/rad}$ Z축 회전 $K_{zr} = 131,517,878 \text{ t.m/rad}$
말뚝두부 면진적용시 기초해석	X축 병진 $K_{xt} = 18,934 \text{ t/m}$ (교축) Y축 병진 $K_{yt} = 18,934 \text{ t/m}$ (교직) Z축 병진 $K_{zt} = 883,529 \text{ t/m}$ (연직) X축 회전 $K_{xr} = 15,966,082 \text{ t.m/rad}$ Y축 회전 $K_{yr} = 45,199,948 \text{ t.m/rad}$ Z축 회전 $K_{zr} = 1,310,812 \text{ t.m/rad}$

마. 해석결과 그래프



바. 해석결과 변위 및 단면력 비교

구분		기초중심 고정	한지거동 기초	말뚝두부면진장치
기초부 단면력 1.0D+1.0E	위치	(P5, 교축직각방향 모멘트)		
	좌측	M= 21,704 tonf.m	M= 21,387 tonf.m	M= 19,154 tonf.m
	우측	M= 21,702 tonf.m	M= 21,388tonf.m	M= 19,127 tonf.m
교대변위		99mm	102mm	101mm

사. 구조해석결과 결론

- (1) 지진시 교대부 변위는 큰 차이가 없으나, 단면력 감소율은 11.7% 임
- (2) 말뚝두부면진장치의 강성차이로 인한 두부의 연직변위는 0.1mm수준임
- (3) 일반적인 탄성반침으로 말뚝두부의 면진장치를 고려하여, 기초의 스프링계수를 낮추었으나, 유연한 면진장치를 적용시에는 단면력감소율은 클것임 (면진장치 유연도에 따라 약 30% 까지 단면력절감 예상)

제3절 연구기간 및 연구내용

1. 연구기간

1차 년도	2009.10.26~2010.06.25(0년 8개월)
2차 년도	2010.06.26~2011.10.25(1년 4개월)

2. 연구목표 및 내용(총괄)

연 차	연구목표	주요 연구내용
1차년도	▪ 힌지 구조계 연구	▪ 라멘교에서 힌지구조계 연구 ▪ PSC BOX교에서 힌지구조계 연구 ▪ 건축물(RC라멘조)에서 힌지구조계 연구
	▪ 전단스프링계수 (탄성과 강재, 탄소섬유 또는 탄소봉) 연구	▪ 탄성고무+철심재 전단스프링계수 연구 ▪ 강재(방수성) 전단스프링계수 연구 ▪ 탄소섬유(탄소봉) 전단스프링계수 연구
	▪ 면진장치 적용성 검토	▪ 기존 면진장치 적용성 연구 ▪ 말뚝두부 정착방안 연구 ▪ 기술의 타당성 및 적합성 검증
2차년도	▪ 적용대상 연구 (강관, 콘크리트 말뚝등)	▪ 강관말뚝에 응용 및 실험체 제작 ▪ PHC 말뚝에 응용 및 실험체 제작 ▪ 대구경말뚝에 응용 ▪ 기존 제품대비 경제성 비교
	▪ 방수처리 등 내구성 연구	▪ 강관말뚝과 콘크리트 말뚝에 면진두부 보강장치 설치 실험 ▪ 방수처리에 연구 ▪ 유지관리에 대한 연구
	▪ 말뚝두부 보강용 면진장치 개발	▪ 면진댐퍼 설계 및 유한요소해석 ▪ 면진댐퍼 시험법 및 시험평가기준 정립 ▪ 면진댐퍼 시제품 제작 및 특성시험 ▪ 면진시스템 방수 및 간격조절, 정착방법 등 환경열화 방지설계

3. 연구내용 및 범위

가. 본 연구의 목표는 말뚝두부 보강에 적합한 면진댐퍼장치를 개발하는데 목적이 있음. 이를 위하여 면진댐퍼장치의 설계 및 성능시험기법을 개발하고, 설계 및 시공지침을 개발하고자 함. 또한 개발된 면진댐퍼장치에 대한 실용화 가능성을 분석하고 신규 교량 및 건축구조물의 기초 설계시 설계 반영하고 현장에 시험 시공할 수 있는 기반을 구축하고자 함.

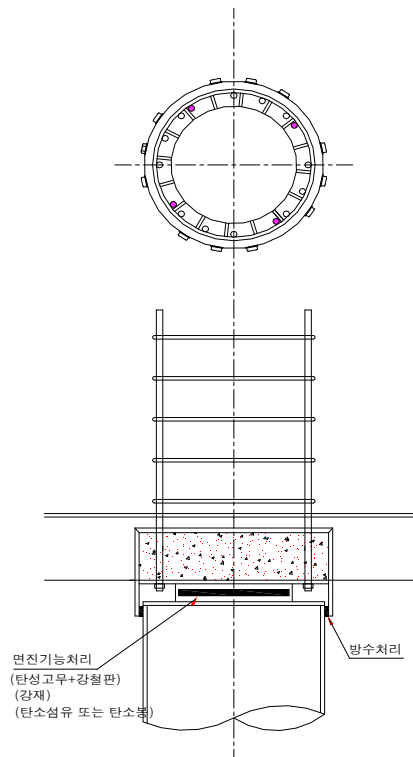


그림 5. 말뚝두부보강 면진댐퍼장치

나. 연구목표를 달성하기 위한 구체적인 연구내용으로는 1차년도 연구결과를 토대로 면진댐퍼장치의 설계 및 시제품 제작을 위한 구조설계 및 해석기법을 정립하고, 고기능성 면진댐퍼장치의 개발을 위하여 신규 교량뿐만 아니라 노후 교량에 사용될 수 있는 면진댐퍼를 개발하고자 함. 또한 면진댐퍼 장치의 성능평가지험기법 및 평가기준을 정립하여 품질표준화하고, 현장적용이 용이한 설계 및 시공기법을 개발하고자 함.

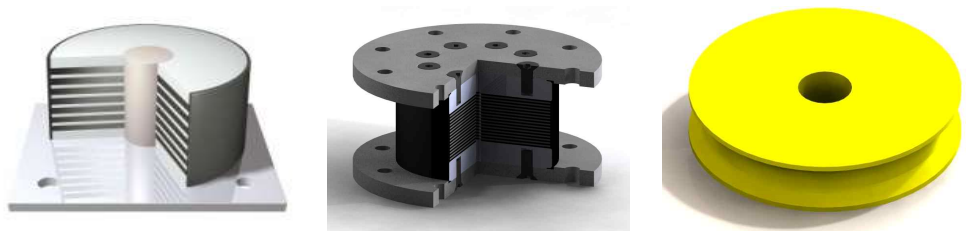


표 9. 면진 댐퍼장치와 유사한 주요제품 형상



그림 6. 면진장치 특성시험(압축-전단 특성시험)

다. 그림 14는 본 연구개발품인 면진댐퍼장치와 거동원리 및 기능이 유사한 기존 내진 및 면진장치를 나타낸 것임. 상기와 같이 다년간 연구를 통해 개발되어 현재 사용되고 있는 면진장치를 응용하여 말뚝두부 보강에 필요한 면진댐퍼를 개발하고자 함. 또한 개발된 면진댐퍼 시제품을 대상으로 그림 15와 같이 각종 특성시험 및 내구성시험을 통하여 품질기준을 제시할 것임.

제4절 연구개발 목표 및 내용

1. 연구개발 최종목표

가. 최종목표

- (1) 면진시설은 구조물 안전성 확보를 위한 중요한 요소로서 구조물에 전달되는 지진하중을 감소하는데 관련 연구가 필요함
- (2) 말뚝 두부보강의 면진 댐퍼시설 연구개발의 경우 지진하중을 구조물 기초에서 일차적으로 지진하중을 감소시키는 것과 다르게 일반적인 면진은 구조물에 기둥 또는 기둥의 상부 받침부에 설치되는 면진시설로 지진하중을 구조물의 면진시설로 지진하중을 절감시키는 방법임
- (3) 말뚝기초를 가지는 교량이나 건축구조물에 지진하중을 말뚝 두부보강의 면진시설에서 절감시키는 장치를 개발하여 실용화하여 국내·외에서 전무한 기술력을 확보하는 것이 최종목표임
- (4) 본 과제는 말뚝 두부보강의 면진 댐퍼시설을 개발하여 실용화하고 국내외 전무한 기술력을 확보하는 것이 최종목표로 다음과 같은 세부목표를 가지고 있다.

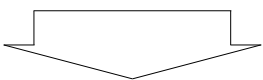
힌지 구조계 연구	본과업의 가장 큰 핵심문제인 강결구조(변위 및 회전 고정)에서힌지구조(변위만 고정)로의 기초설계가 전체구조계(건축물과 교량)에 어떤 변화를 일으키는지 비교 연구
전단 스프링 계수 연구	힌지구조가 문제가 없으므로 면진(상시에는 변위고정, 지진시에는 변위수용) 구조연구의 다음 프로세스는 전단스프링계수 연구수행하며, 전단스프링은 크게 탄성고무 또는 강재(방식이 된 강재), 탄소섬유의 전단스프링을 적용하여 계수값 산정
적용 대상 연구	말뚝두부보강은 강관말뚝에서 설치되고 있으므로 면진두부보강 장치는 적용이 무난하나, PHC, 및 현장타설말뚝 등 콘크리트 말뚝에의 적용연구
방수처리 등 내구성 연구	지하수위하에서 본 장치의 방식처리를 통한 내구성 확보 방안 연구(교량의 경우 내구수명은 100년이므로 100년 이상의 내구성을 지니도록 연구)

표 3. 과제를 위한 세부목표

2. 최종목표의 성격 및 설정 근거

- 가. 최종 성과물은 제품의 개발과 실제 현장에서의 응용을 목표로 함
- 나. 현재까지 국내·외 면진기술은 교량의 경우 기둥상부의 면진받침과 특수 건축물의 기둥하부에 면진받침이거나 기둥에 가새를 설치하는 댐퍼시설이었으나, 말뚝기초의 두부보강에 면진기능을 부여하여 기능성을 추가한다면 손쉽게 지진하중을 감소시킬수 있을 것임
- 다. 연구기간 1차 년도와 2차년도로 구분하여 총 2년이 소요될것으로 예상됨
- 라. 말뚝두부보강의 면진 댐퍼시설 개발에 대한 관련 연구의 검토 필요성 등의 이유로 현재 여건에서는 많은 어려움이 있으므로 다음과 같이 ① 힌지 구조계 연구, ② 전단 스프링 계수 연구, ③ 적용 대상 연구, ④ 방수처리 등 내구성 연구 단계 등 4단계로 구분하여 진행

1차년도	▪ 1단계 : 힌지 구조계 연구
	▪ 2단계 : 전단스프링계수 (탄성과 강재, 탄소섬유) 연구
2차년도	▪ 3단계 : 적용대상 연구 (강관, 콘크리트 말뚝) 및 실물제작
	▪ 4단계 : 방수처리등 유지관리 내구성 연구 및 실험



최종목표	말뚝두부보강 면진장치 제품화
------	-----------------

표 4. 최종목표를 위한 연구단계

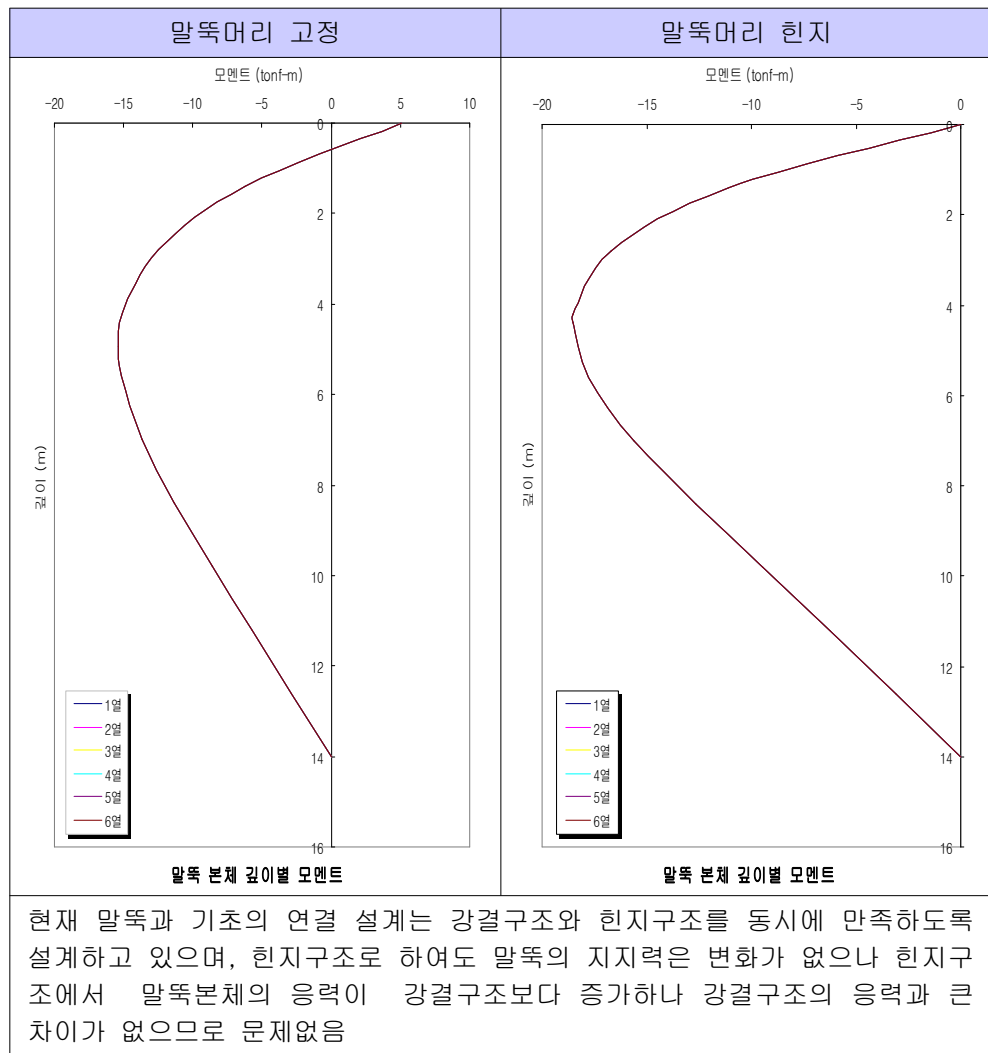
3. 핵심연구 내용

가. 힌지 구조계 연구

현재의 말뚝은 기초와 강결하는 구조(변위나 회전고정)이나 본 연구의 면진시설은 경계조건을 힌지구조(변위만 고정)로 변경하게 되므로 이러한 기초접합부가 전체구조계(건축물과 교량)와 말뚝(반력과 말뚝응력)에 어떤 변화를 일으키는지 비교 연구

나. 전단스프링계수 (탄성고무, 강재 및 탄소섬유) 연구

면진(상시에는 변위고정, 지진시에는 변위수용)구조연구의 다음 프로세스는 전단스프링계수 연구 수행하며, 전단스프링은 크게 탄성고무 또는 강재(방식이 된 강재), 탄소섬유의 전단스프링을 적용하여 계수값 산정



4. 연구단계 순서도

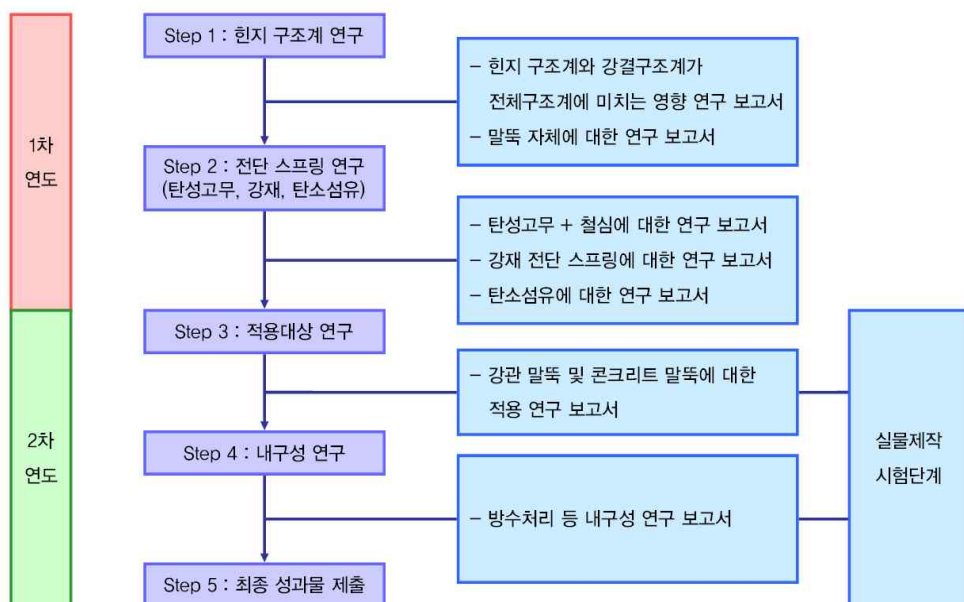


그림 7. 연구단계 순서도

5. 최종 성과목표

가. 최종 성과목표/성과지표

성과목표	성과지표		측정방법	최종 목표치	가중치	목표치 설정 근거
계획설계기술	1-1	수치해석건수 (말뚝두부 힌지거동)	수치해석 및 구조계산 작성건수	3건	0.080	라멘교 힌지거동 구조계산 1건
						PSC BOX교 힌지거동 구조계산 1건
						건축물 힌지거동 구조계산 1건
	1-2	수치해석 건수 (말뚝두부 전단 스프링)	수치해석 및 구조계산 작성건수	3건	0.160	전단스프링(탄성고무) 수치해석 1건
						전단스프링(강재) 수치해석 1건
	1-3	기술의 타당성 및 적합성 검증	기술의 타당성 및 적합성 검증	1건	0.011	전단스프링 (탄소 섬유 또는 탄소봉) 1건
적용성 검토	2-1	특성실험건수 (내진 및 면진받침)	기초특성 실험건수	3건	0.155	지진격리받침 특성실험 1건
						탄성고무받침 특성실험 1건
						EDS받침 특성실험 1건
신공법 개발	3-1	신공법 개발건수	말뚝정착도안건수 (강재, PC말뚝)	2건	0.095	강재말뚝 정착방안 1건
						PC말뚝 정착방안 1건
기술성능 목표달성	4-1	원천기술확보(재질별 적용)	설계도면	2건	0.150	말뚝재질별 적용도면(강관, 콘크리트말뚝)
	4-2	원천기술확보(유지관리 용이)	보고서	1건		유지관리 보고서
	4-3	원천기술확보(내구성 구조 개발)	보고서	1건		내구성 구조 보고서
	4-4	원천기술확보 (면진 말뚝두부설치 전체계 해석)	구조해석	3건		면진말뚝두부설치 전체계 해석 계산서
논문	5-1	SCI(E)급 게재 논문건수	논문제재	1건	0.025	면진두부보강에 관한 요약보고서 SCI(E)급 게재 1건
지적재산권	6-1	특허등록	특허 등록	2건	0.012	공법특허 1건
기술실시계약	7-1	기술실시계약	기술실시계약	1건	0.025	면진두부장치 1건
연구개발성과홍보	8-1	연구개발성과홍보	연구개발성과홍보	1건	0.025	학술지 발표
경제성 비교	9-1	경제성 비교	기존 제품대비 경제성 비교	5%	0.012	경제성 비교
면진댐퍼 설계/해석	10-1	설계도면 설계기법	구조계산서 설계도면	2건	0.015	적용형태별 산정
	10-2	해석건수	해석결과보고서	1건		FEM 해석
면진댐퍼 특성시험법/성 능기준 정립	11-1	시험방법	시방서	1건	0.005	국내외기준
	11-2	평가기준	시방서	1건	0.005	국내외기준
	11-3	시방기준	시방서	1건	0.005	국내외기준
	11-4	감쇠비	특성시험	15%	0.008	국내외 수준이상
시제품 제작/ 특성시험	12-1	시제품	시제품 수	5set	0.050	제품 제작건수
	12-2	특성시험	시험결과보고서	1건	0.020	성능평가기준(안)
	12-3	인장강도	특성시험	15MPa	0.020	국내외 수준이상
	12-4	전단탄성계수	특성시험	1.4MPa	0.020	국내외 수준이상
	12-5	허용회전각	특성시험	0.02rad	0.020	국내외 수준이상
	12-6	받침 처짐량	특성시험	30%이내	0.020	국내외 수준이상
환경열화방지설계	13-1	간격조절	설계도면	1건	0.025	적용형태별 산정
	13-2	방수처리	설계도면	1건	0.037	적용형태별 산정

6. 성과지표 설정의 타당성 및 근거

가. 연구개발 목표와 성과 목표의 연계성

연구개발의 목표는 말뚝에 쓰이는 말뚝두보강에 면진시스템의 도입으로 세계에서 전무한 면진기술상 원천기술력을 가지고 국위선양과 실제 구조물에서 적용이 가능한 상용화에 있음

나. 성과 목표와 성과지표의 연계성

계획설계기술은 말뚝두보강은 강결구조에서 힌지거동으로 전환에 대한 전체계와 말뚝본체에 미치는 영향을 분석하기 위해 필요하며, 원천기술력을 확보하기 위해 전단스프링의 수치해석의 연계가 필요하며, 제품의 상용화와 홍보를 위해 제품성능테스트, 논문게재 및 특허등록이 필요함

다. 성과지표별 가중치 설정 근거

연구예산소요금액상 가중치를 분석하였으며, 수치해석가중치 0.1(힌지거동) + 0.2(전단스프링 연구) = 0.3, 실험 가중치 0.4, 논문게재 가중치 0.1, 지적재산권가중치 0.2를 부여하였음

제5절 연구개발 추진전략

1. 추진방안

가. 본 연구과제의 연구수행에 있어 충실한 연구결과를 확보하기 위해 각 연구기관의 주력업무 특성에 맞는 업무분장을 실시한 연구추진체계의 확립이 중요함

나. 또한, 면진시설과 관련된 국내·외 기존 연구실적에 대한 철저한 문헌검토를 실시하고, 해외 면진 신기술을 적극 검토함

다. 뿐만 아니라, 정부의 관련기관과 연구기관, 기업과 협력하여 전문가 집단의 협력체계를 구축함으로써 본 연구과제의 연구진행시 어려움을 해소하고 필요시 해외 연구 자료를 활용하여 추진함

2. 기술 혁신방안

가. 단계별 연구성과를 전파하고 국내·외 관련 논문, 기술보고서 및 인터넷 자료 수집 등을 통해 연구 및 적용사례에 대한 조사 자료를 확보하며 또한 연구기관 등의 관련 유사 사례를 활용하기 위한 국내·외 연구자료 활용을 통해 말뚝 두부보강 면진 시설을 위한 인프라를 구축함

나. 연구의 완성도를 높이기 위하여 과학적, 공학적 판단 근거자료를 확보하고 이를 바탕으로 연구 결과를 도출하여 지진에 대한 우수한 면진 시설 연구를 확보함

다. 연구개발을 통해 정립된 면진에 필요한 중요 요소들을 공학적 판단에 의하여 검토

제6절 연구개발 추진내용

1. 1차년도 세부 추진계획 및 방법

일련 번호	연구내용	세부추진 계획 및 방법	수행 기간 (주)
1	1. 힌지구조계연구 (라멘교) - 라멘교의 강결결합 및 힌지결합의 지진시 응답치 비교	- 실제 설계 또는 시공된 설계자료를 구조 해석	12주
2	1. 힌지구조계연구 (라멘교) - 라멘교의 강결결합 및 힌지결합의 지진시 응답치 비교	- 실제 설계 또는 시공된 설계자료를 구조 해석	12주
3	1. 힌지구조계연구 (라멘교) - 라멘교의 강결결합 및 힌지결합의 지진시 응답치 비교	- 실제 설계 또는 시공된 설계자료를 구조 해석	12주
4	1. 전단스프링 연구(탄성고무) - 말뚝 두부보강 연진재질별 이력곡선 연구	- 전단스프링을 설치하였을 경우 구조해석 - 강결, 힌지, 스프링 결합시 지진응답치 비교	12주
5	1. 전단스프링 연구(강재) - 말뚝 두부보강 연진재질별 이력곡선 연구	- 전단스프링을 설치하였을 경우 구조해석 - 강결, 힌지, 스프링 결합시 지진응답치 비교	12주
6	1. 전단스프링 연구(탄소섬유 또는 탄소봉) - 말뚝 두부보강 연진재질별 이력곡선 연구	- 전단스프링을 설치하였을 경우 구조해석 - 강결, 힌지, 스프링 결합시 지진응답치 비교	12주
7	1. 기초문헌조사 - 국내외 기술자료조사	- 국내외 학술자료/기술자료 조사 및 분석 - 국외 유사기술 연구개발 사례조사 - 관련 설계기준 및 시방서 검토 - 연진댐퍼장치 피로설계 검토	12주
8	1. 연진받침 기초특성연구 (적층고무계, 폴리우레탄계, 강재계 받침 등) - 기존 받침장치별 기초특성 및 적용성 연구	- 적층고무계(HDRB, RB 등) 특성시험 - 폴리우레탄계(EDS, Disk) 특성시험	12주
9	1. 말뚝두부정착방법 연구 - 말뚝종류별 정착방안 연구	- 강재말뚝 두부 정착방안 - PC말뚝 두부 정착방안	12주
10	1. 종합보고서 작성		4주

2. 연도별 주요 추진 일정

일련 번호	연구내용	추진 일정 (연도별)								비중 (%)
		1차년도				2차년도				
		1/4	2/4	3/4	4/4	1/4	2/4	3/4	4/4	
1	힌지구조계연구 (라멘교)									6.2
2	힌지구조계연구 (PSC BOX교)									6.2
3	힌지구조계연구 (건축물)									6.3
4	전단스프링 연구 (탄성고무)									12.5
5	전단스프링 연구 (강재)									6.2
6	전단스프링 연구 (탄소섬유 또는 탄소봉)									12.5
7	말뚝 재질별 적용성 연구									6.3
8	유지관리성 연구									6.3
9	내구성 구조 개발 연구									12.5
10	연진말뚝두부설치 전체계 영향 연구									12.5
11	SCI(E)급 논문 게재									6.2
12	특허등록									6.3

제2장 국내외 기술개발 현황

제1절 국내외 관련 기술 및 산업 동향

1. 건축 구조물의 면진 및 댐퍼시설

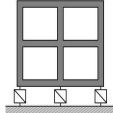
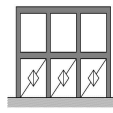
건축물 - 면진받침	건축물-브레이싱 댐퍼
 Structure with Isolator Type Nonlinear Link	 Structure with Damper Type Nonlinear Link

표 5. 건축구조물의 면진 및 댐퍼시설

2. 토목구조물 (교량 받침) - 면진받침

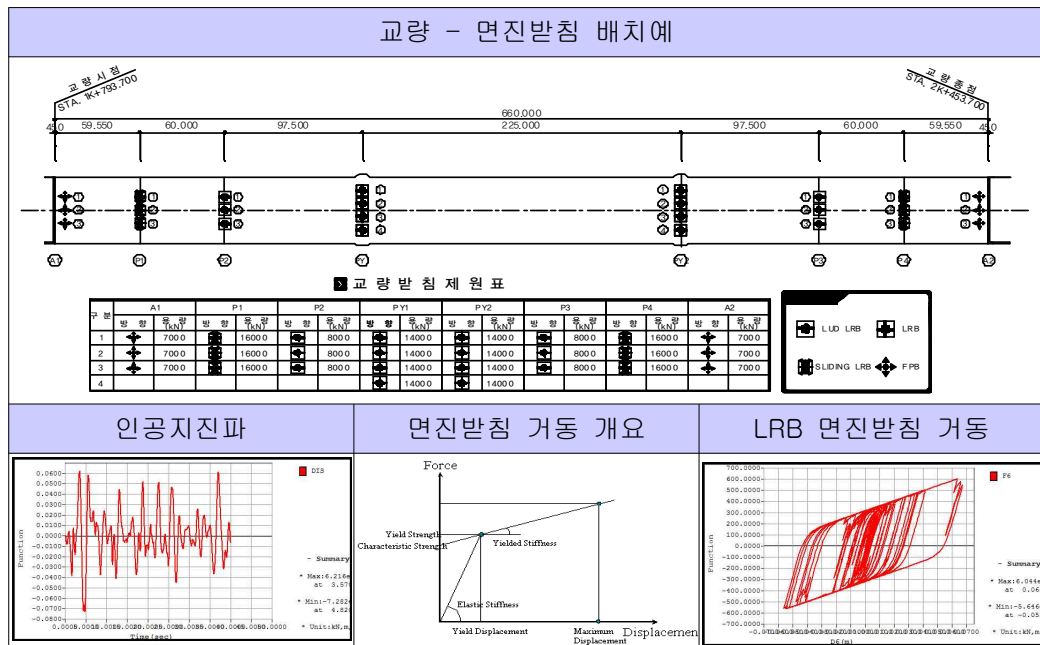


표 6. 토목 구조물(교량 받침) - 면진받침

3. 토목구조물 (무조인트 교대) : 면진보다는 주행성 향상이 목적

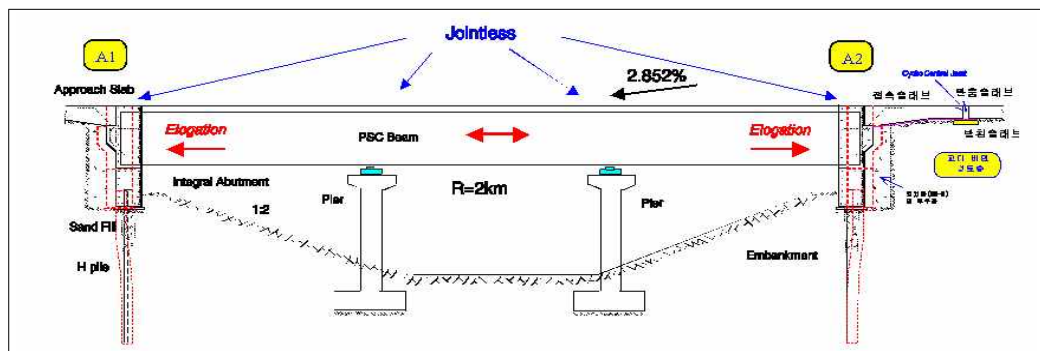


표 7. 토목 구조물(무조인트 교대)

제2절 국내 기술 및 산업 동향

1. 국내의 경우는 일본이나 미국의 서부처럼 지진 위험도가 높은 지역은 아니지만 1970년대부터 지진에 대한 계기관측을 시작한 이래 우리나라의 연간 지진발생 빈도는 점점 증가하는 상황

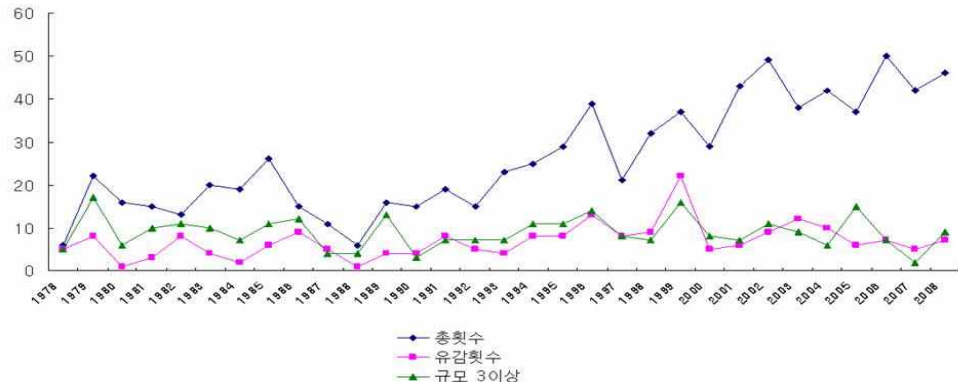


그림 8. 지진발생 빈도(2009, 통계청)

규모	빈도	발생횟수 / 년	비고
$6.5 < M < 7.0$	—	—	발생가능 한계범위
$6.0 < M$	4	0.2	
$5.0 < M$	19	1.1	
$4.0 < M$	133	7.4	
$3.0 < M$	152	8.4	
합 계	308회/18년	17.1	

표 8. 국내 계측지진의 규모 및 발생빈도(1978-1995)

2. 홍성 지진 이후 미국의 ATC 3-06과 UBC의 내진설계 방법을 기초로 국내에서 1988년 내진설계에 대한 지침의 발간과 함께 규정과 지침의 정립으로 지진에 대한 구조물 안전성 확보에 많은 발전을 이룸
3. 지진에 대해서 시공되는 일반적인 구조물이나 국내 최초로 시공된 면진 구조물 등은 대부분 기둥이나 기둥 상부 받침부에 면진 시스템을 설치하여 지진에 대한 구조물 안전성을 확보하였음
4. 일반적으로 국내에서는 지진에 대한 많은 연구가 진행되고 있으나 일반적으로 단면을 증가시키거나 강재량을 증가시키는 내진관련 연구와 지진하중을 감소시키는 면진에 대한 연구가 진행됨
5. 국내 시장 현황

가. 본 과제의 목표는 말뚝두부보강의 면진 댐퍼시설을 연구 개발하는 것으로, 본 연구의 목적이 영리가 아니므로 금액적인 산정이 불가하지만 매년 발생하는 지진 피해의 증가로 인하여 건설구조물에 적용시 경제적으로 큰 효과를 얻을 수 있으며 사회적으로 많은 효과를 얻을 수 있으리라 예상됨

6. 국내 시장 예측

- 가. 국내 지진 발생 건수의 증가로 인하여 지진하중을 일차적으로 맡뜰 두부의 면진 시설에서 수용하여 내진효과가 향상될 것으로 예측되며, 이는 지진 발생시 지진하중으로 인한 구조물의 안전성 확보에 효과적일 것으로 사료됨
- 나. 또한 신설 및 기존의 구조물에 대한 유지 관리시 교체가 용이하도록 정착 방법을 고안하고 있으며 이는 향후 국내외 시장에 있어 경제적 효과가 예상됨
- 다. 그리고 구조 기초 및 지반, 구조물 분야의 기술 및 설계 기준과 관련된 특허나 논문 등에 관한 연구가 활성화될 전망이다
- 라. 마지막으로 본 연구의 효과적인 면진 댐퍼시설이 연구 개발되면 국토 자원을 효율적으로 이용 가능화될 전망이다

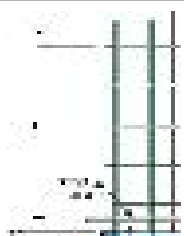
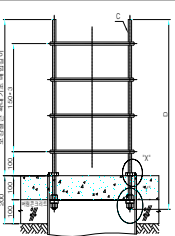
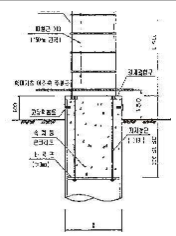
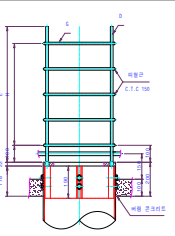
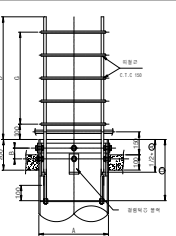
구 분	RCM공법 (신기술387호)	DAP공법 (특허 제10-0625948호)	합성형 두부보강 공법 (신기술307호)	볼트식 덮개판 공법 (신기술 134호)	볼트식 속채움 두부보강 공법 (신기술 373호)
개요도					
보 강 원 리	속채움콘크리트 (강관직경)	속채움콘크리트 (강관직경)	속채움콘크리트	용접식	속채움콘크리트 (강관직경)

표 9. 두부보강 관련 특허 및 신기술

제3절 국외 기술 및 산업 동향

1. 일 본

- 가. 일본은 세계에서 대표적인 지진 다발지역으로 메이지유신 이후 지진 및 내진구조에 관한 과학적 연구를 시작하여 지진에 대한 많은 연구가 진행

시기	제안	내용
Nobi 지진 M8.0(1891)		벽돌조 파괴, 연약지반에서 지진피해 증가 수평방향의 관성력의 안전성 검토의 필요성
1916년	가옥내진 구조론	- 등가정적수평력 제안 - 동경의 예상진도를 0.3으로 제시 - 기둥이 분담하는 지진력 진도에 따라 분배 - 설계용 지진력을 수평진도로 표기
1919년	도시계획법, 시가지건축물법	- 일본 최초의 건축물에 관한 국가 법률 - 6대도시에 적용

시기	제안	내용
Kanto 대지진 M7.9(1923)		RC는 불규칙 평면형, 벽이 적은 구조에서 발생 반면 RC 내진성, 내화성은 높이 평가
1924년 06월	시가지건축물법 시행규칙 개정	- 설계진도 0.1의 도입 - 간토지진에 의한 도쿄의 최대 지동 가속도 0.3g로 평가 - 구조물을 강체로 가정하여 진동에 의한 증폭을 무시 - 재료강도에 대한 허용응력도 안전율을 3으로 고려
1924년 12월	구조강도계산규준	- 연직하중과 지진력에 의한 응력을 조합 - 설계용 지진력을 일정한 수평진도로서 산정 - 횡력에 의한 구조물 해석에서 적재하중을 절반까지 저감
1937년 05월	시가지건축물법 시행규칙 개정	- 실의 용도를 세분화하여 기둥의 연진력 저감 - RC조에 관해 철근의 인장 허용응력도를 완화
1938년 06월	철근콘크리트 구조계산규준 개정	- 설계진도는 탄성체의 경우 0.1보다 크게 사용하도록 지적
2차 세계대전		비상시의 재료를 절약하는 설계 요구
1941년 12월	건축물의 내진구조요항	- 지진동 특성으로 지반의 탁월주기가 다르다는 점 - 내진성 향상을 위해 건물 중량을 경감할 것 - 수평강도와 강성을 크게 할 것 - 구조계획상 잘 정리된 평면으로 할 것 - 구조계획상 내진벽을 균등하게 배치할 것 - 구조계획상 견고한 대지를 선정할 것 - 내진계산방법상 건물 상부에서 수평진도를 크게 할 것 - 내진계산방법상 지하에서 수평진도를 저감할 것
1942년	전시건축규격작성 위원회	- 설계하중을 크게 하는 반면 재료의 안전율을 작게 하여 건축재료의 절감을 유도 - 설계용 수평진도는 보통지반에서 0.15, 연약지반에서 0.20
1950년	건축기준법, 건축기준법 시행령 제정	- 수평진도 $k=0.2$이상 채용 - 탄성거동을 바탕으로 $k=0.2$의 수평력에 대해 탄성변위 내에 있는 강도를 건물에 부여하면 대지진시에 도 건물이 보전할 수 있다
Tokachi-oki 지진 M7.9(1968)		RC조 피해는 순라멘 구조에서 기둥의 압괴 및 붕괴 피해원인은 지표진도 0.2의 초과 가능성, 충분한 잉여강도 부족
1971년	건축기준법 시행령 개정	- 철근콘크리트의 전단보강근 간격에 관한 개정
1971년 05월	단기 허용응력도설계	- 허용전단력의 크기가 종국보강근 간격에 관한 개정 - 기둥 및 보의 허용전단력 산정식 제언
1977년 04월	내진진단규준·내진 개수 지침 간행	- 1968년 Tokachi-oki 지진 후에 건설성, 문부성, 건설회사에서 내진진단 및 보강기술을 각각 개발

시기	제안	내용
Miyagiken-oki 지진 M7.4(1978)		- 평면적으로 편심이 큰 건물 피해 - 높이 방향으로 강성분포가 변하는 건물 피해
1981년	건축기준법 개정	- 지반, 건물의 고유주기, 평면·입면의 밸런스 등 건물의 동적응답성상에 미치는 영향을 고려 - 중소지진, 대지진 두 개의 크기에 대해 각각 허용응력도설계, 보유수평내력의 검토를 하는 2단계 설계법 채용
Hyogoken nanbu 지진 M7.2(1995)		- 건물에 작용하는 지진동의 크기와 예상되는 손상 정도에 관한 공통인식 부족 - 건축물의 성능규정화로 건물의 성능을 건축주와 설계자가 확인하면서 설계
1998년	건축기준법 개정	- 성능규정화

표 10. 일본의 지진연구 역사

- 나. 1950년대 관련법 정립과 함께 과학기술의 발전으로 지진에 대한 많은 연구와 설계방법 및 시설이 개발
- 다. 일반적으로 건축물 내진 장치에 대한 연구가 활발하며 최근에는 6층 목조 건축물을 40초 동안 진도 7.5의 가상 지진실험에서 구조물의 안전성 실험을 실시



그림 9. 6층 목조 건축물의 내진 안전성 실험(2009.07, 일본)

라. 일본의 경우 건축물은 건물 상부구조물과 기초 사이에 볼 베어링이나 스프링, 고무패드를 지진 충격이 건물에 전달되는 것을 막는 '면진(免震)' 기술이 각광을 받고 있는데 이는 지진이 발생하면 충격을 완화시키는 댐퍼(damper·충격흡수장치)가 건물과 기초 사이에 설치되어 건물을 통째로 움직여 피해를 줄이는 역할을 하게 되며 이러한 댐퍼는 지름 1~2m의 크기 원형으로 고무와 철판을 교대로 쌓은 형태로 돼 있고 댐퍼는 하나가 수백톤을 지탱할 수 있으며 건물 크기와 해당 지역의 예상 지진 강도에 따라 설치 숫자가 달라지게 적용하고 있음

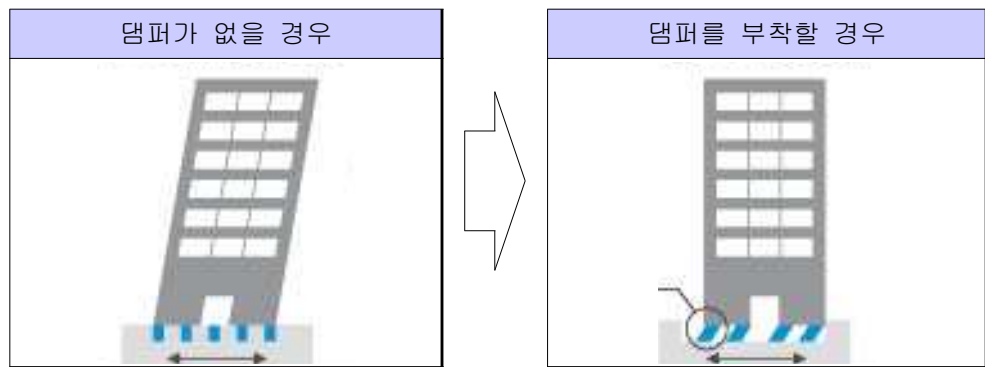


그림 11. 댐퍼사용 여부에 의한 건축물 변화

2. 미 국

- 가. 1925년 내진규준이 규정된 이후 제한적 성능목표를 가진 초보적 단계로부터 시작하여 현재 많은 발전을 거듭하여 왔음
- 나. Applied Technology Council(ATC)에 의하여 내진공학의 새로운 발전방향이 제시되고 현재까지도 내진 설계 규준에 대한 연구가 진행되어 왔음
- 다. 기존 구조물에 대한 보강기법 연구로 Structural Engineers Association of California에 의하여 FEMA 273/274 지침이 개발, Applied Technology Council에 의하여 ATC-40 지침이 개발

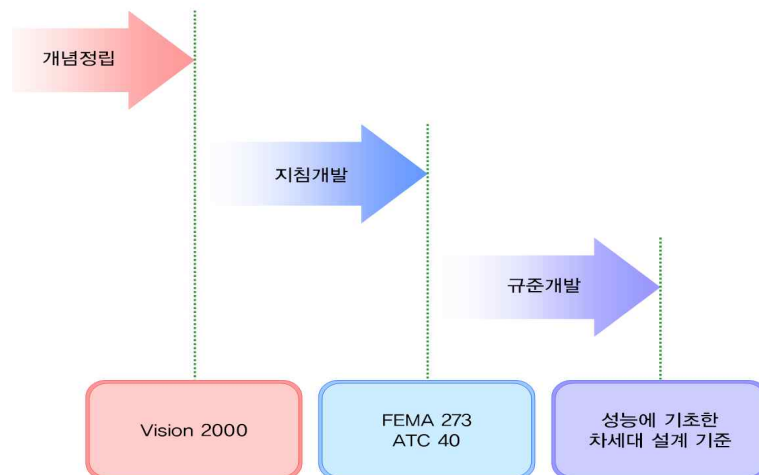


그림 10. 미국의 차세대 내진설계법의 발전 동향(1998), 이한선

- 라. 개념정립과 지침의 개발을 통해 성능에 기초한 차세대 설계 규준을 정립하여 규정한 신뢰도 범위 내에서 기준 지반운동 수준에 의한 구조물 손상수준이 규정된 한계상태 또는 기타 효용성 한계를 초과하지 않도록 정의
- 마. 미국의 경우 일반적으로 지진에 대한 구조물 안전성 확보는 내진이나 면진을 설계에 반영한 구조물로 대부분 기둥이나 기둥상부 받침부에서 이루어짐.

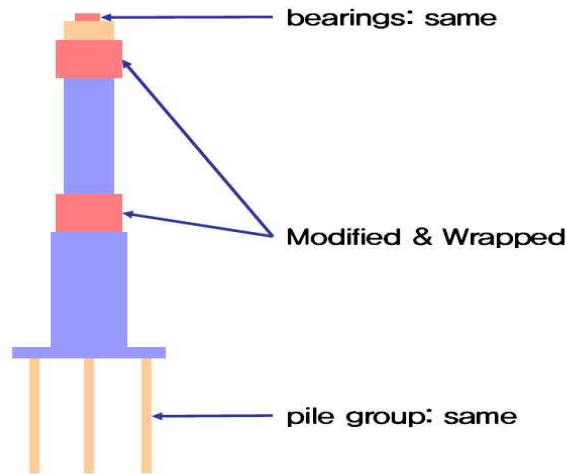


그림 11. 기둥에 면진장치 설치 위치



그림 12. 기둥에 면진장치 설치 사진(미국, 일리노이주)

- 바. 최근에는 무조인트 교대 교량이 이미 시공되었는데 이는 교대의 말뚝의 강성을 약하게 하여 변위를 수용하는 구조로 수평하중의 절감효과가 있으나, 상부연직하중을 수용하기 위한 말뚝의 소요개수가 많을 경우 교대에 적용이 불가능한 실정이고 말뚝의 재질이 강관이나 원형 콘크리트 말뚝이 아닌 변위가 잘 발생하는 H-말뚝으로 연직하중 수용에 한계가 있으며 근본적인 목표가 신축이음장치를 삭제하여 도로 주행성능대에 있으므로 말뚝 두부보강에서 지진하중을 감소시키는 면진구조물적용은 전 세계적으로 전무한 실태임

제4절 특허 동향

1. 말뚝 두부보강의 면진댐퍼시설과 관련된 국내·외 특허사항 없음
2. 말뚝 두부보강의 면진댐퍼시설 국내특허 출원준비 중

제3장 연구개발수행 내용 및 결과

제1절 연구개발결과

1. 연구개발결과 요약

연 차	연구 내용	연구 결과
1차년도	- 라멘교에서 힌지구조계 연구 - PSC BOX교에서 힌지구조계 연구 - 건축물(RC라멘조)에서 힌지구조계 연구	- 지중구조물에서 말뚝두부면진 장착후 면진성능확인(모멘트 26%감소) - 강상형교,PSC교량에서 말뚝두부면진 장착후 면진성능확인(모멘트 10~35%감소) - 건축물에서 말뚝두부면진 장착후 면진성능확인(모멘트 17~20%감소)
	- 탄성고무+철심재 전단스프링계수 연구 - 강재(방수성) 전단스프링계수 연구 - 탄소섬유(탄소봉) 전단스프링계수 연구	- 고무면진계열인 납면진 (LRB)과 고감쇠 고무 (HDRB) 2가지 TYPE에 대해 전단스프링을 연구한 결과 면진기능이 우수하고 방수처리가 양호해 내구성이 우수하므로 가장적절하다고 판단 - 강재면진계열인(EDS)에 대해 검토한 결과 면진기능은 우수하나 방수처리가 불리하여 내구성이 저하되므로 적절하지 않음 - 탄소섬유 또는 탄소봉에 대해서는 내구성은 우수하나, 면진기능에 대해 검증이 되지 않았으며, 에너지 소산기능과 복원기능이 없으므로 면진장치로서는 적절치 않다고 판단됨
	- 기존 면진장치 적용성 연구 - 말뚝두부 정착방안 연구	- 강재말뚝에 대한 정착방안 고안이 완료되었으며,PHC말뚝연시 강관말뚝과 동일하며, 실제 제작시 문제점에 대해서는 보완예정 - 말뚝두부면진장치가 말뚝기초(주로 강관말뚝과 PHC 말뚝같은 소구경말뚝)나 직접기초의 면진기능으로 쓰일 경우 리히터 규모 5.5이상의 강진에 대해서 추가적인 구조물의 내진 안전성확보 가능.
	기술의 타당성 및 적합성 검증	경제적 타당성은 구조물별로 면진성능의 발효치는 각기 다르지만 본 말뚝면진두부면진장치가 대량생산이 될 경우 경제적가치가 탁월하다고 판단됨

2. 이론적 배경

가. 지진격리방법

지진격리장치인 면진장치는 기초와 말뚝사이에 설치하여 교각에 작용하는 전단력을 줄이고 상판으로 전달되는 지지력을 감소시키는 역할을 한다. 면진 원리로는 구조물의 고유진동수를 지진에너지가 우수한 진동수 영역 밖으로 이동시킴으로써 지진에너지의 전달을 차단하게 되며, 또한 감쇠의 증가를 통해 에너지를 흡수 분산시키게 된다. 응답 특성으로는 고유주기를 늘림으로 해서 가속도 응답은 작아지게 되는 반면에 변위응답은 커지게 되는데 이때 과도한 변위발생에 의한 낙교를 방지하기 위해 감쇠를 적절히 두어 변위가 허용범위 안에 들도록 해야 한다. 현재 사용되는 지진격리장치의 종류 및 특징은 다음과 같다.

(1) LRB system

가장 널리 사용되는 면진장치로써 고무에 강재철판을 보강함으로써 수직방향의 강성을 증가시켰다. 자체의 감쇠능력이 작아 추가적인 감쇠장치가 함께 쓰이는 경우가 많으며 기초격리를 위한 주요기능은 고유주기의 이동이다.

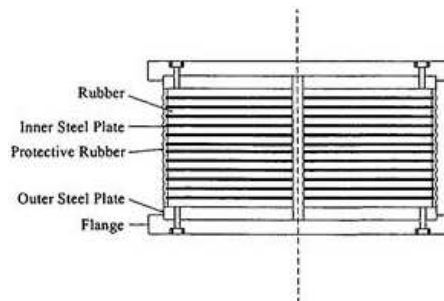


그림 13. LRB의 구조

면진장치가 선형탄성적으로 거동하는 면진구조를 선형면진 구조라고 하며 이러한 선형면진구조의 대표적인 예가 바로 LRB시스템이다. 이 시스템은 횡방향 스프링과 댐퍼(viscous damper)로 구성되어 있다. 다음 그림은 LRB시스템의 역학적 모델이다.

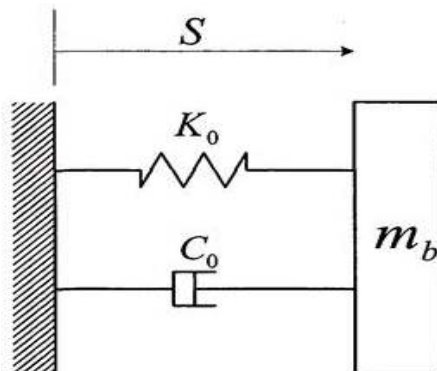


그림 14. LRB의 역학적 모델

(2) P-F system

마찰감쇠 면진구조로서 모든 기초격리장치 중에서 가장 간단한 시스템이다. 마찰판사이에 미끄러짐이 발생하면 그때 발생하는 수평마찰력이 구조물이 받는 지반 가속도를 감소시키고 구조물의 수평변위를 줄이는 역할을 한다. 그리고 마찰에 의한 변위로 에너지를 흡수하여 구조물을 지진으로부터 보호하게 된다. 변위에 대한 복원력이 없는 것이 이 시스템의 단점이며 약한 지진시에는 미끄러짐이 발생하지 않는다. 이때는 구조물의 기초격리장치가 없는 경우와 동일하게 된다. 그리고 임계값을 넘는 큰 지반가속도를 받는 경우에만 미끄러짐이 일어나 기초격리 효과가 발생하게 된다. 다음 그림은 P-F시스템의 역학적 모델이다.

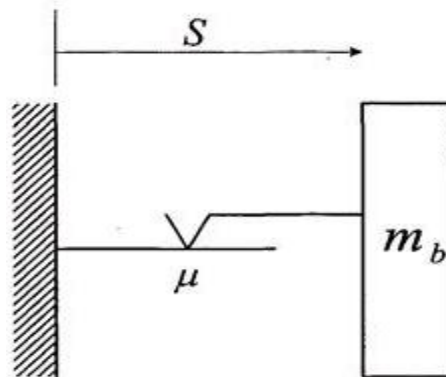


그림 15. P-F시스템의 역학적 모델

(3) R-F system

LRB시스템과 P-F시스템을 합쳐놓은 형태로서 임계값에 미달되는 지반가속도에 대해서는 작동하지 않고 그 이상의 지반가속도에 대해 마찰판의 미끄러짐이 발생하고 이때 마찰에 의해 에너지를 흡수 분산시키게 된다. P-F시스템과 달리 변위가 발생했을 때 복원력을 가지게 되는 장점이 있다.

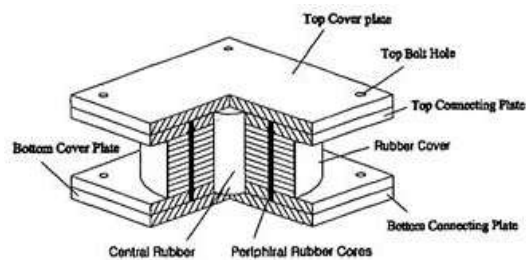


그림 16. R-F시스템의 구조

다음은 R-F시스템의 역학적 모델이다.

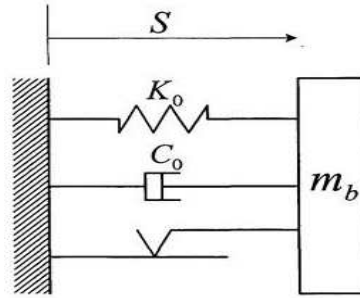


그림 17. R-F시스템의 역학적 모델

이 시스템은 스프링, viscous Damper와 마찰 Damper로 구성되어 있다. 이 시스템의 경우도 P-F시스템의 경우와 같이 변위에 대해 지배 방정식이 미끄럼상태와 정지상태로 나누어 진다.

(4) EDF(Electricite de France) System

강재판으로 보강된 횡유연성을 가진 Neoprene Bearing 위에 마찰판이 있는 구조로 되어있다. 설계지진강도 즉 임계값보다 작은 지반가속도에서는 Neoprene Bearing이 탄성적으로 거동을 한다. 이때는 LRB시스템과 유사한 거동을 보인다. 그리고 임계값보다 큰 지반가속도에 대해서는 마찰판에서 미끄러짐이 발생하여 지진력을 감소시키게 된다. EDF시스템의 역학적 모델은 다음과 같다.

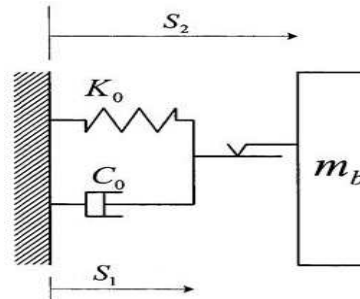


그림 18. SR-F 시스템의 역학적 모델

이 시스템은 스프링, viscous Damper와 그 상부의 마찰판으로 구성된다. 변진장치의 변위는 상부변위와 하부변위로 나타낸다. 이 시스템 역시 상부 마찰판이 정지상태일 때와 미끄럼상태일 때에 따라 지배 방정식이 다르다.

(5) SR-F(Sliding Resilient Friction) System

R-F 시스템과 EDF 시스템의 장점을 결합시킨 시스템이다. 즉 EDF 시스템의 Neoprene Bearing을 R-F 시스템으로 대체한 형태가 된다. 이 시스템은 큰 상대변위를 일으키지 않고도 효과적으로 가속도 응답을 줄일 수 있는 장점이 있다. 상부 마찰판이 정지상태이고 상부 마찰판이 미끄럼상태이면 P-F시스템과 같이 거동한다. 두 개의 마찰판이 모두 정지상태이면 변진장치가 없는 구조물과 같은 상태가 된다. 이 시스템의 역학적 모델은 다음과 같다.

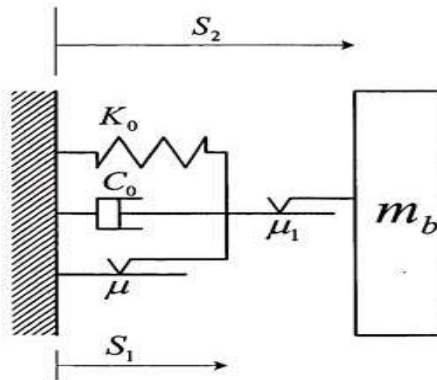


그림 19. SR-F 시스템의 역학적 모델

이 시스템에서는 상부 마찰판과 중앙부 마찰판이 있으므로 각각의 마찰판이 정지 상태인가 미끄러진 상태인가에 따라 지배방정식이 달라진다.

(6) NZ(NEW Zealand) System

LRB시스템을 개선하여 중앙에 납봉을 넣어 추가적인 에너지 분산장치로 사용한다. 여기서 납의 전단, 항복을 통해 다량의 에너지를 흡수하고 격리장치의 횡변위를 줄이게 된다. 이때 이 납봉은 재료 댐퍼로써 작용함으로 이 면진구조는 재료 감쇠 면진구조가 된다.

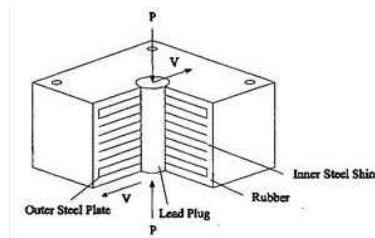


그림 20. NZ 시스템 구조

이 시스템의 역학적 모델은 다음과 같다.

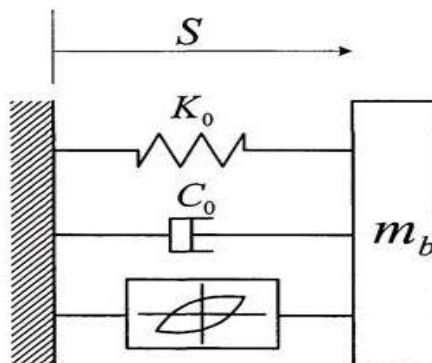


그림 21. NZ 시스템의 역학적 모델

이 시스템은 스프링, Viscous Damper 그리고 Damper로 구성되어 있다.

나. 직접기초에 대한 적용성

말뚝 두부 면진이 직접기초나 말뚝기초와 직접기초의 혼용구조에 쓰일 경우 적용성이 있는지 검토하였다.

Foundation On the Rock에 수록된 아래 그림의 (d)를 보면 베드콘크리트를 친후 Serew Jack으로 단차를 조절(adjustment)하는 그림임을 알 수 있다. 이를 응용하여 말뚝두부면진장치를 직접기초에 사용하는 경우를 검토한 결과 면진기능이 우수한 것으로 판명되었다.

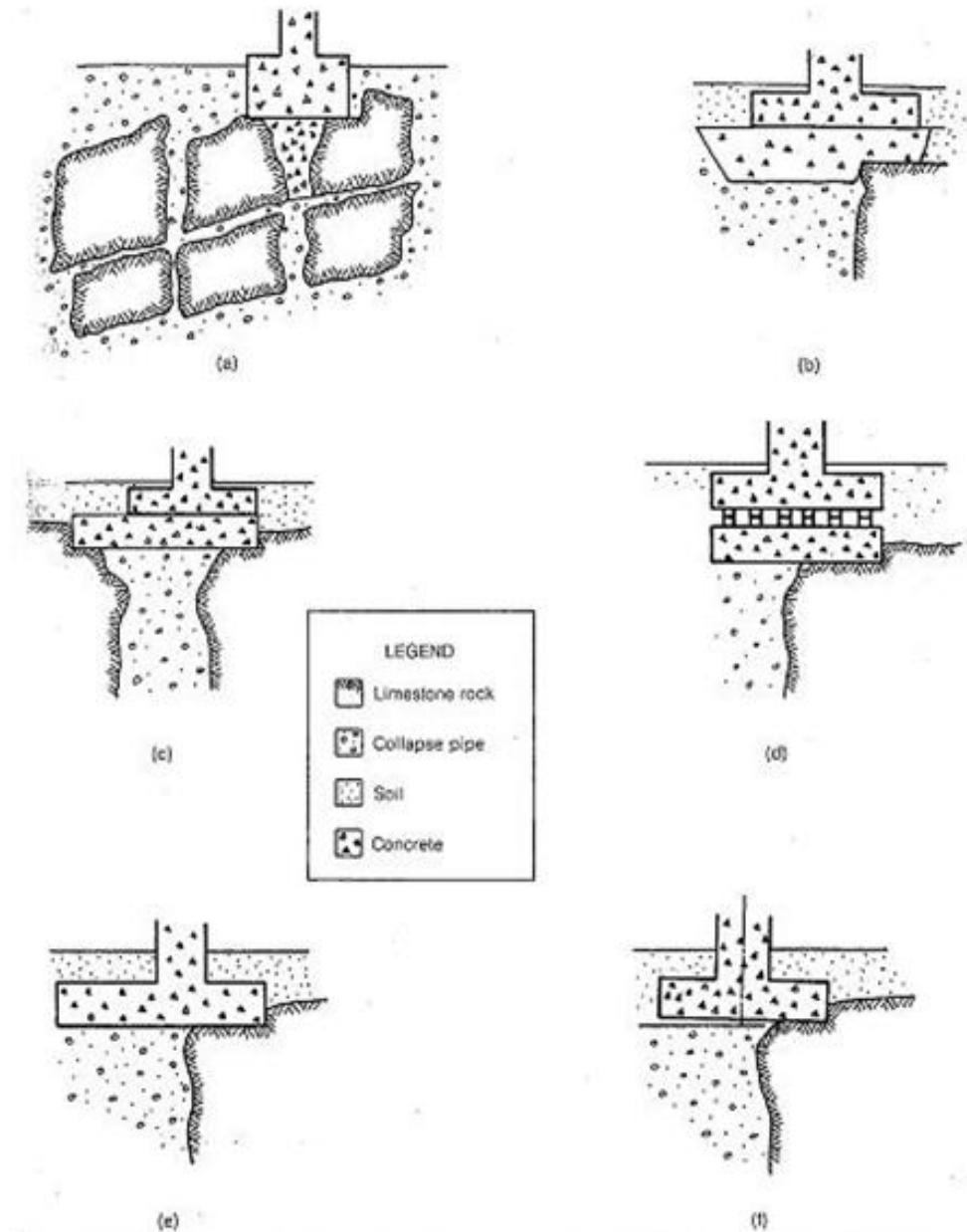
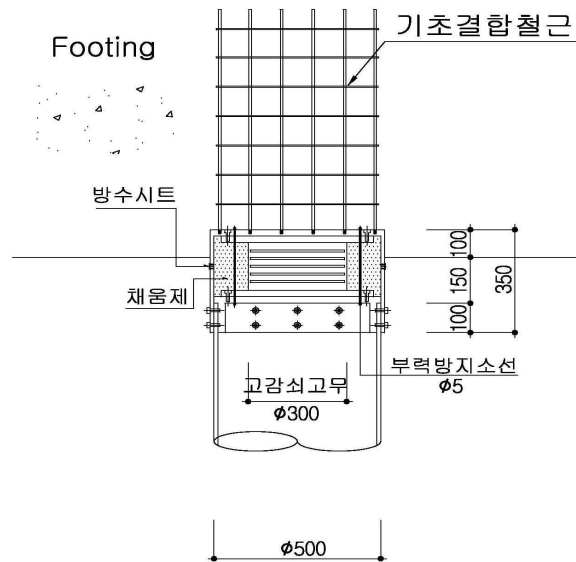


Figure 5.7 Examples of construction procedures for spread footings on karstic terrain (after Katzenbach and Romberg, 1987): (a) concrete plug; (b) partial replacement of collapse material with concrete; (c) footing supported by underground bridge; (d) shallow foundation with screw jacks for adjustment; (e) load eccentricity; and (f) inclination of pier.

3. 말뚝두부 먼진장치

가. 말뚝 두부 먼진장치도



(1) 기본구성 : 먼진기능(고감쇠 고무)+방수기능(방수시트, 채움재)+기초결합(철근, 볼트)

(2) 시공 및 유지관리 편의를 위해 본 먼진장치는 모듈화된 제품으로 개발
나. 말뚝재질별 먼진장치도

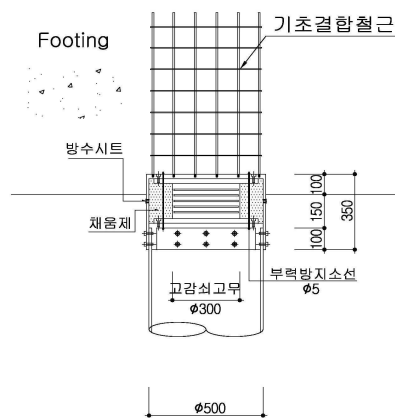


그림 22. 강관말뚝

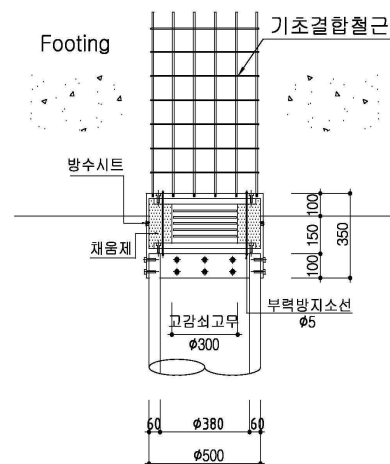


그림 23. PHC 말뚝

다. 기초별

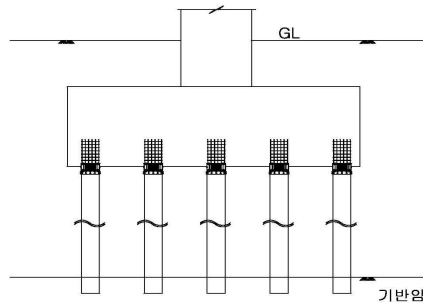


그림 24. 말뚝기초 적용

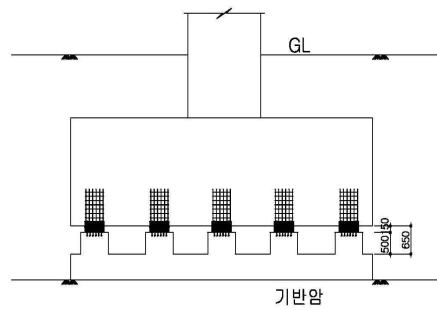
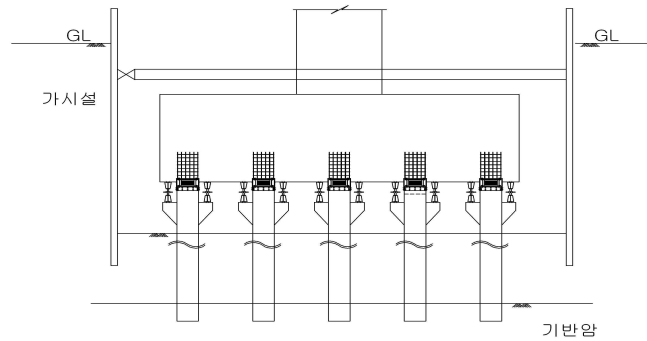


그림 25. 직접기초 적용

라. 유지보수 - 1차년도는 개괄적 개념제시, 2차년도에서 구체화 수립+



(1) 유지관리 교체방안 : 가시설 설치 후 잭 설치 및 본 장치를 교체

4. 지반반력계수 및 결함방법에 의한 검토(도로교 설계기준 해설 2008)

가. 지반반력계수

지반반력계수는 지반이 탄성적인 거동을 보여주는 범위 내에서 기초의 변위량이나 지반반력을 구하기 위해 필요한 상수이다

$$k = \frac{p}{\delta}$$

여기서, k : 지반반력계수(kN/cm³)

δ : 변위량(cm)

p : 지반반력(kN/cm³)

지반은 탄성체가 아니고 또 깊이방향으로 밀도나 압축성이 변하기 때문에 지반반력-변위량 곡선은 아래그림과 같이 비선형의 모양을 나타낸다.

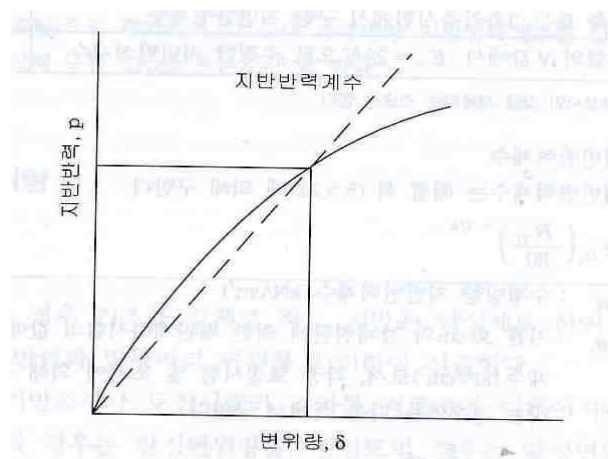


그림 26. 지반반력-변위량 곡선

따라서 지반반력계수는 변위량과 더불어 변화하지만 여기서는 변위량과 지반반력의 할선경사로서 지반반력계수를 정의하였다. 지반반력계수는 지반과 구조물의 상호작용을 나타내는 값이며, 따라서 변위량뿐만 아니라 구조물의 형상, 치수, 강성 등의 영향을 받는다. 또한 이외에도 재하시간, 깊이에 따른 지반특성 변화, 시험시와 실제구조의 재하상태의 차이 등의 영향을 받는 아주 복잡한 성질을 갖는 상수이다. 그러므로 토질시험 및 현장시험 결과로부터 설계에 쓰이는 지반반력계수를 결정하는 경우에는 위에서 설명한 여러 가지 요소를 고려하여야 한다.

(1) 연직방향 지반반력계수

연직방향 지반반력계수는 아래식으로 구한다.

$$k_V = k_{V_0} \left(\frac{B_V}{30} \right)^{-3/4}$$

여기서, k_V : 연직방향 지반반력계수(kN/cm³)

k_{V_0} : 지름 30cm의 강체원판에 의한 평판재하시험의 값에 상당하는 연직방향 지반반력계수(T_n (kN/cm³))로서 각종 토질시험 및 조사에 의해 구한 지반탄성계수로부터 추정하는 경우에는 다음 식에서 구한다.

$$k_{V_0} = \frac{1}{30} a E_0$$

B_V : 기초의 환산재하폭(cm)으로서 다음 식에서 구한다. 다만, 저면현상이 원형인 경우에는 지름으로 한다.

$$B_V = \sqrt{A_V}$$

E_0 : 아래 표에 나타난 방법으로 측정 또는 추정한 설계의 대상이 되는 위치에서의 지반탄성계수(kN/cm²)

a : 지반반력계수의 추정에 쓰이는 계수

A_V : 연직방향의 재하면적(cm²)

E_0 와 a 값

다음의 시험방법에 의한 지반탄성계수 E_0 (kN/cm ²)	a	
	평상시	지진시
지름 30cm의 강체원판에 의한 평판재시험을 반복시킨 곡선에서 구한 지반탄성계수의 1/2	1	2
보링공 내에서 측정한 지반탄성계수	4	8
공시체의 1축 또는 3축압축시험에서 구한 지반탄성계수	4	8
표준관입시험의 N 값에서 $E_0 = 28N$ 으로 추정한 지반탄성계수	1	2

주) 폭풍시는 평상시의 값을 사용하는 것으로 한다.

(2) 수평방향 지반반력계수

수평방향 지반반력계수는 아래식에 의해 구한다.

$$k_H = k_{H_0} \left(\frac{B_H}{30} \right)^{-3/4}$$

여기서, k_H : 수평방향 지반반력계수(kN/cm³)

k_{H_0} : 지름 30cm의 강체원판에 의한 평판재하시험의 값에 상당하는 수평방향 지반반력계수(kN/cm³)로서, 각종 토질시험 및 조사에 의해 구한 지반탄성계수로부터 추정하는 경우에는 다음 식에서 구한다.

$$k_{H_0} = \frac{1}{30} a E_0$$

B_H : 하중작용방향에 직교하는 기초의 환산재하폭(cm).

일반적으로 탄성체 기초의 수평저항에 관여하는 지반으로서는 설계지반면에서 $1/\beta$ 까지 고려하면 된다.

a : 지반반력계수의 추정에 쓰이는 계수

E_0 : 아래표에 나타난 방법으로 측정 또는 추정한 설계의 대상이 되는 위치에서의 지반탄성계수(kN/cm²)

환산재하폭 B_H

기초형식	B_H
직접기초	$\sqrt{A_H}$
케이슨기초($\beta l < 2$)	$\sqrt{A_H}$
케이슨기초($1 < \beta l < 2$)	$\sqrt{D/\beta}$
말뚝기초	$\sqrt{D/\beta}$
강관널말뚝기초	$\sqrt{D/\beta}$

주) A_H : 하중작용방향에 직교하는 기초의 재하면적(cm²)

D : 하중작용방향에 직교하는 기초의 재하폭(cm)

β : 기초의 특성값(cm⁻¹), $\beta = \sqrt[4]{\frac{k_H D_B}{4EI}}$

EI : 기초의 휨강성(kN · cm²)

기초의 수평방향 지반반력계수는 말뚝기초나 수평변위량의 검사를 필요로 하는 케이슨 기초 및 강관널말뚝기초에서 환산재하폭 B_H 를 $\sqrt{D/\beta}$ 에 의해 구한 후, 기준변위량에서의 탄성체기초의 수평방향 지반반력계수를 산정하도록 하였다. 그런데 기준변위량은 탄성체기초의 수평방향 지반반력계수를 산정할 때 기준이 되는 변위량이며, 기초 거동의 탄성한도에 있어 수평방향 지반반력계수를 산정하기 위한 기준값으로서 설정한 것이다. 기초의 기준변위량은 기준폭의 1%(≤5.0cm)로 한다. 탄성체 기초의 B_H 를 산정할 때의 k_H 는 설계지반면에서 $1/\beta$ 까지 깊이의 평균값을 사용한다. 또 지반을 다층(多層)으로 평가하여 각 층의 수평방향 지반반력계수를 산출하는 경우에도 각층의 환산재하폭은 상기에 의해 구한 B_H 를 쓰는 것으로 한다.

나. 말뚝과 확대기초의 결합부

말뚝머리부의 결합방식으로는 일반적으로 강결합과 힌지결합이 있고, 어느 방식을 채용하는가 하는 것은 구조물의 형식과 기능, 확대기초의 형태와 치수, 말뚝의 종류, 지반조건, 시공 난이도 등을 고려하여 책임기술자가 결정하여야 한다. 다만, 교량기초의 경우에는 말뚝머리 고정, 즉 강결합으로 설계하는 것을 원칙으로 한다. 그 이유는 수평변위량에 따라 설계가 지배되는 경우 유리하고, 부정정차수가 높기 때문에 내진상의 안정성이 유리하다.

(1) 강결합 방법

말뚝과 확대기초의 강결합 방법은 아래그림에 표시된 방법 A와 B가 있다.

방법 A	확대기초 속에 말뚝을 일정한 길이만 매입시키고, 매입된 부분이 말뚝머리에 작용하는 휨모멘트를 저항하는 방법	- 매입길이는 말뚝지름 이상으로 한다 - PSC 말뚝, PHC 말뚝, RC 말뚝에 적용할 수 있다.
방법 B	확대기초 속으로 매입되는 말뚝의 길이를 최소한으로 하고, 철근을 말뚝머리에 보강하여 말뚝머리에 작용하는 휨모멘트를 철근이 저항하는 방법	- 말뚝머리부의 근입길이는 10cm로 한다 - 강관말뚝, PSC말뚝, PHC말뚝, RC 말뚝, 현장타설말뚝에 적용할 수 있다.

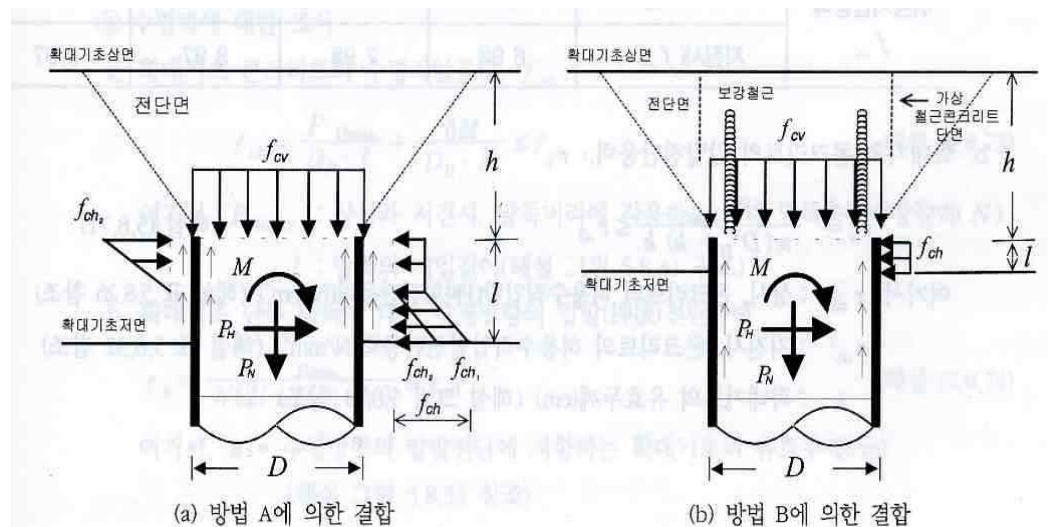


그림 27. 말뚝 머리부의 결합 방법

(2) 설 계

말뚝머리 결합부에서 외력전달은 다음과 같이 생각할 수 있다.

- (가) 압입력 또는 인발력은 말뚝주면과 확대기초 콘크리트의 전단저항 또는 말뚝머리부에 대한 확대기초 콘크리트의 지압저항에 의하여 지지시킨다.
- (나) 수평력은 매입된 말뚝의 전면에서 확대기초 콘크리트의 지압저항에 의하여 지지시킨다.
- (다) 휨모멘트는 방법 A의 경우 매입된 말뚝의 전후면에서 확대기초 콘크리트의 지압저항에 의하여 방법 B의 경우 결합용 철근을 포함한 가상철근콘크리트 기둥의 휨저항에 의하여 지지시킨다. 또한, 확대기초는 말뚝머리에 작용하는 축방향력에 대하여 충분한 강도가 필요하다.

(라) 방 법 A

① 강관말뚝

말뚝머리에 작용하는 설계하중에 대하여 다음과 같은 응력을 조사한다.

㉠ 압입력에 대한 조사

(a) 확대기초 콘크리트의 수직지압응력, f_{cv}

$$f_{cv} = \frac{P_{Nmax}}{\frac{\pi}{4} D_B^2} \leq f_{ca}$$

여기서 f_{ck} : 콘크리트의 설계기준강도(M/mm²)

P_{Nmax} : 상시와 지진시, 말뚝머리에 작용하는 가장 큰 수직력(N)

D_B : 말뚝의 외경(cm)

f_{ca} : 상시, 콘크리트의 허용지압응력 = $0.25 f_{ck}$ (N/mm²)(아래표 참조)

f_{ca}' : 지진시, 콘크리트의 허용지압응력 = $1.33 \times (0.25 f_{ck})$ (N/mm²)

여기서, 철근콘크리트 구조물의 허용응력설계법에서 지진시 허용응력은 상시 허용응력에 허용응력 증가계수 1.33을 곱한 값으로 취할 수 있다.

확대기초의 허용지압응력, f_{ca} (N/mm²)

설계기준강도 f_{ck}		21.0	24.0	27.0	30.0
허용지압응력 f_{ca}	상시(f_{ca})	5.25	6.00	6.75	0.70
	지진시(f_{ca}')	6.98	7.98	8.97	9.97

(b) 확대기초 콘크리트의 압발전단응력, r_v

$$r_v = \frac{P_{Nmax}}{\pi(D_B + h)h} \leq r_{a3}$$

여기서 r_{a3} : 상시, 콘크리트의 허용수직압발 전단응력 (N/mm²)

r_{a3}' : 지진시, 콘크리트의 허용수직압발전단응력 (N/mm²)

h : 확대기초의 유효두께(cm)

확대기초의 허용지압압발전단응력, r_{a3} (N/mm²)

콘크리트의 설계기준강도, f_{ck}		21.0	24.0	27.0	30.0
허용압발 전단응력	상시(r_{a3})	0.85	0.90	0.95	1.0
	지진시(r_{a3}')	1.131	1.197	1.264	1.33

② 인발력에 대한 조사

인발력에 의한 말뚝외주와 확대기초 콘크리트의 전단저항력은 다음과 같다.

$$r_{vt} = \frac{P_{Umax}}{\pi(D_B + h_t)h_t} \leq r_{a3}$$

여기서, P_{Umax} : 상시와 지진시, 말뚝머리에 작용하는 말뚝축방향 최대인발력(N)

h_t : 인발전단력에 저항하는 확대기초의 유효두께(cm)

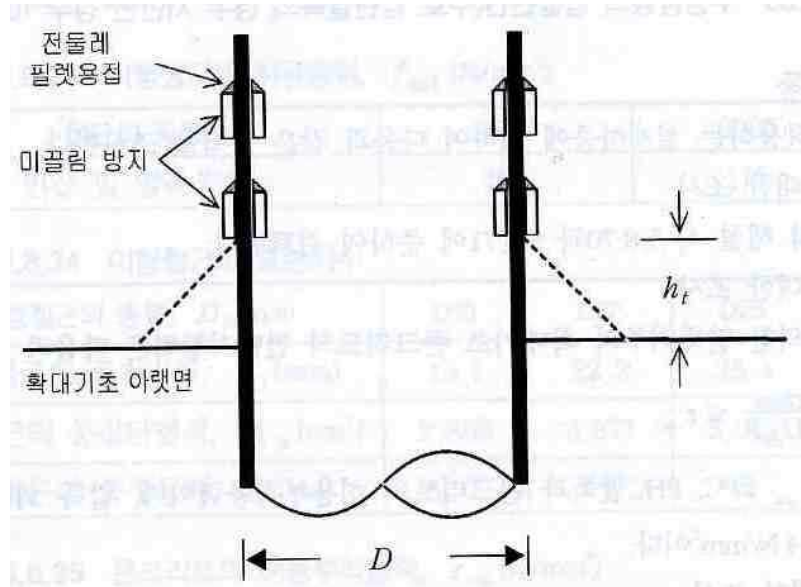


그림 28. 인발전단력에 저항하는 확대기초의 유효 두께

③ 수평력에 대한 조사

㉑ 확대기초 콘크리트의 수평지압응력, f_{ch}

$$f_{ch} = \frac{P_{Hmax}}{D_B \cdot l} + \frac{6M}{D_B \cdot l^2} \leq f_{ca}$$

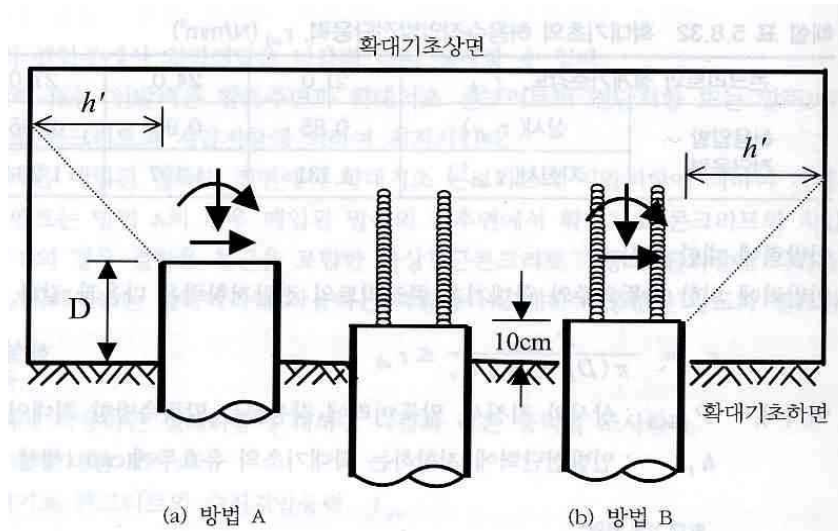
여기서, P_{Hmax} : 상시와 지진시, 말뚝머리에 작용하는 최대 말뚝축직각방향력(N)

l : 말뚝의 매입길이

㉒ 확대기초 단부 말뚝에 대한 수평방향의 압발(押拔)전단응력

$$r_h = \frac{P_{Hmax}}{h'(2l + D_B + 2h')} \leq r_{a3}$$

여기서, h' : 수평방향의 압발전단에 저항하는 확대기초의 유효두께(cm)



수평방향의 압발전단(주로 강관말뚝의 경우 지반면 상부 10cm에서 두부를 절단)

④ PSC, PHC 말뚝

말뚝머리에 작용하는 설계하중에 대하여 다음과 같이 응력을 조사한다.

㉠ 압입력에 대한 조사 : 강관말뚝에 준하여 검토한다.

㉡ 인발력에 대한 조사 : 인발력에 의한 말뚝외주와 확대기초 콘크리트의 전단저항력은 다음과 같다.

$$r_c = \frac{P_{Umax}}{\pi D_B l} \leq r_{ac}$$

여기서, r_{ac} : PC, PHC 말뚝과 콘크리트의 허용부착응력이며, 말뚝 외주면이 깨끗하게 청소된 상태는 0.14N/mm²이다.

㉢ 수평력에 대한 조사 : 강관말뚝의에 준하여 검토한다.

⑤ RC 말뚝

원칙적으로 PSC, PHC 말뚝에 준하여 설계한다.

(마) 방법 B

① 강관말뚝

㉠ 압입력에 대한 검토 : 강관말뚝에 준하여 검토한다.

㉡ 인발력에 대한 검토 : 원칙적으로 인발력에 대한 검토는 하지 않아도 된다.

㉢ 수평력에 대한 검토

(a) 확대기초 콘크리트의 수평지압응력, f_{ch}

$$f_{ch} = \frac{P_{Hmax}}{D_B \cdot l} \leq f_{ca}$$

여기서 l : 말뚝의 매입길이 = 10(cm)

(b) 확대기초 단부 말뚝에 대한 수평압발전단응력, r_h : 강관 말뚝에 준하여 검토한다.

㉔ 철근강착

철근의 정착길이는 다음 식에서 구한다.

$$L_0 = \frac{f_{sa1} A_{st}}{r_{oa} U}$$

여기서 f_{sa1} : 이형철근의 허용인장응력(N/mm²)

A_{st} : 이형철근의 공칭단면적(cm²)

U : 이형철근의 공칭둘레길이(cm)

r_{oa} : 콘크리트의 허용부착응력(N/mm²)

d_1 : 이형철근의 공칭지름(cm)

일반적으로, $L_o \geq L_{omin} = 35d_1$ 로 하는 것이 좋다. 만약 L_o 값이 L_{omin} 값보다 작으면 L_{omin} 값을 사용한다.

이형철근의 허용응력, f_{sa1} (N/mm²)

철근의 종류	SD30	SD35	SD40
인장 및 압축응력	150	175	180

이형철근의 표준치수

이형철근의 종류, D_B (mm)	D19	D22	D25	D29	D32
이형철근의 공칭지름, d_1 (mm)	19.1	22.2	25.4	28.6	31.8
이형철근의 공칭단면적, A_{st} (cm ²)	2.865	3.871	5.067	6.424	7.942
이형철근의 공칭둘레, U (cm)	6.0	7.0	8	9	10

콘크리트의 허용부착응력, r_{oa} (N/mm²)

콘크리트의 설계기준강도 (f_{ck})	21.0	24.0	27.0	30.0
이형철근과 콘크리트의 허용부착응력 (r_{oa})	1.4	1.6	1.7	1.8

㉕ 확대기초 속에 말뚝머리부분의 매입길이는 최소한 10cm로 한다.

㉖ 가상철근콘크리트 단면의 응력

아래그림과 같이, 상부구조물의 하중(V_0, H_0, M_0)이 변위법에 의하여 각 열의 말뚝머리로 작용하는 하중형태는 2가지가 있다. 하나는 말뚝머리에 작용하는 축방향 최소압입력 (P_{Nmin})과 설계휨모멘트(M)이고 다른 하나는 말뚝머리에 작용하는 축방향 최대인발력 (P_{Umax})과 설계휨모멘트(M)이다.

해당 구조물의 말뚝머리 하중조건에 따라 가상철근콘크리트 단면을 가정하여 콘크리트와 철근의 응력을 검토한다. 여기서 가상철근콘크리트 단면의 직경은 말뚝직경에 20cm를 더한 길이로 한다. 이때 계산은 상시와 지진시에 대하여 교축방향과 교축직각방향에 생기는 외력에 대해서 실시한다.

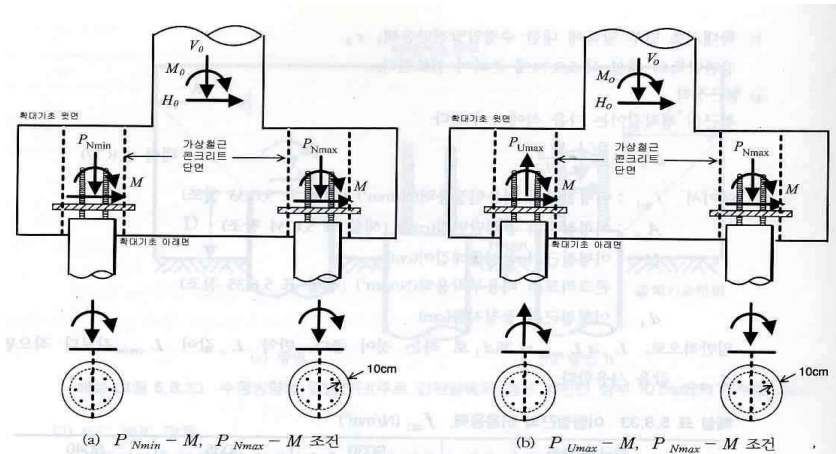


그림 29. 가상 철근콘크리트 단면 검토

여기서 콘크리트의 휨압축응력과 보강철근의 휨인장응력은 다음 식에서 결정한다.

(a) 콘크리트 휨압축응력

$$f_c = \frac{M}{r^3} \cdot C < f_{ca}$$

여기서, f_{ca} : 상시, 콘크리트의 허용휨압축응력 = $0.4f_{ck}$ (N/mm²)

f_{ca}' : 지진시, 콘크리트의 허용휨압축응력 = $1.33 \times f_{ca}$ (N/mm²)

C : 콘크리트의 휨압축응력 계수

M : 변위법으로 결정된 말뚝머리부의 휨모멘트(Nmm)

(b) 보강철근의 휨인장응력

$$f_s = \frac{M}{r^3} \cdot S \cdot n < f_{sa}$$

여기서 f_{sa} : 상시, 보강철근의 허용인장응력(N/mm²)

f_{sa}' : 지진시, 보강철근시 허용인장응력 = $1.33 \times f_{sa}$ (N/mm²)

S : 보강철근의 휨인장응력계수

그리고 콘크리트의 휨압축응력계수 C와 보강철근의

휨인장응력계수 S는 $\frac{e}{r}$ 와 np의 함수이며, 인발하중

과 모멘트, 그리고 압축하중과 모멘트 하중조합을 고려할 수 있는 RG표를 이용할 수 있다. 여기서, 편심,

$$e = \frac{M}{P_N} = -\frac{M}{P_u}, \text{ 탄성계수비, } n=15 \text{를 나타낸다.}$$

② PSC, PHC 말뚝

- ㉑ 압입력에 대한 검토 : 강관말뚝에 준하여 검토한다.
- ㉒ 인발력에 대한 검토 : 인발력에 작용하는 경우 말뚝체 내 보강철근을 사용하는 것으로 한다. 이 경우 원칙적으로 인발력에 대한 검토를 하지 않아도 좋다.
- ㉓ 수평력에 대한 검토 : 강관말뚝에 준하여 검토한다.
- ㉔ 철근장착 : 철근의 장착길이, L_o 는 강관말뚝 방법 B에서 구하는 식과 동일하다.
- ㉕ 확대기초 속에 말뚝머리부분의 매입길이는 최소한 10cm로 한다.
- ㉖ 가상철근콘크리트 단면의 응력

말뚝머리에 작용하는 축방향 최소압입력(P_{Nmin}) 또는 최대 인발력(P_{Umax})과 설계휨모멘트(M), 그리고 말뚝머리에 작용하는 축방향 최대압입력(P_{Nmax})과 설계휨모멘트(M)가 작용하는 경우 가상철근콘크리트 단면을 가정하여 콘크리트와 철근의 응력을 검토한다. 여기서 가상철근콘크리트 단면의 직경은 말뚝직경에 20cm를 더한 길이로 한다. 또한 PSC강재는 무시한다.

③ RC 말뚝

원칙적으로 PSC, PHC 말뚝에 준하여 설계한다.

④ 현장타설말뚝

원칙적으로 PSC, PHC 말뚝에 준하여 설계한다. 철근의 정착길이, L_o 는 강관 말뚝 방법 B에서 구하는 식과 동일하다.

(3) 구조세목

(가) 방법 A

강관말뚝의 구조세목을로서, 말뚝본체 내·외 미끌림 방지는 2단 설치하는 것을 표준으로 한다. 미끌림 방지의 폭은 두께보다 두 배 이상으로 한다. 미끌림 방지의 현장용접은 그 시행을 고려하여 미끌림 방지 상면의 전 둘레를 필렛 용접한다

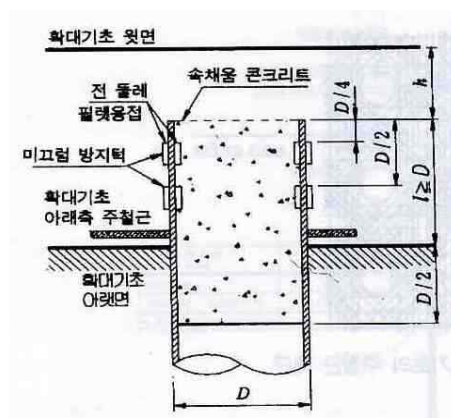


그림 30. 강관말뚝(방법 A)

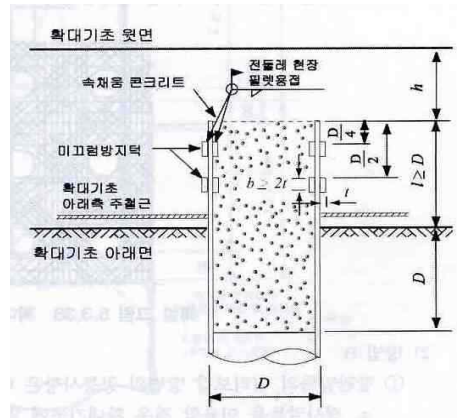


그림 31. 강관말뚝의 미끄러짐 방지

말뚝지름, D_B (mm)	미끄럼 방지 두께, t(mm)
800 미만	9
800 이상 ~ 1200 미만	12
1200 이상 ~ 1500 미만	16

표 11. 말뚝본체 내·외의 미끄러짐 방지 두께

① PSC, PHC 말뚝의 구조세목은 아래그림과 같다.

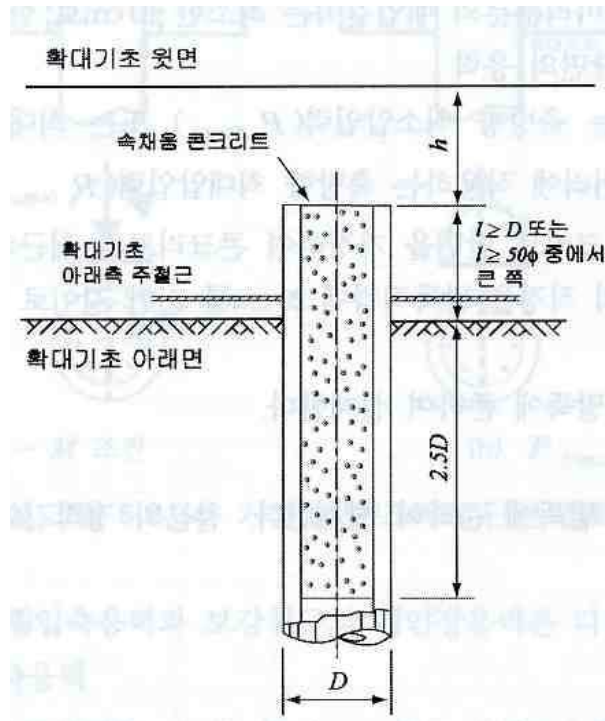


그림 32. PSC·PHC 말뚝, RC 말뚝(방법 A)

② RC 말뚝의 구조세목은 PSC, PHC 말뚝에 준한다.

방법 A에 따라 말뚝머리 부분을 처리할 경우 말뚝에 의하여 확대 기초 하부주철근이 절단되므로 아래그림과 같이 배근한다.

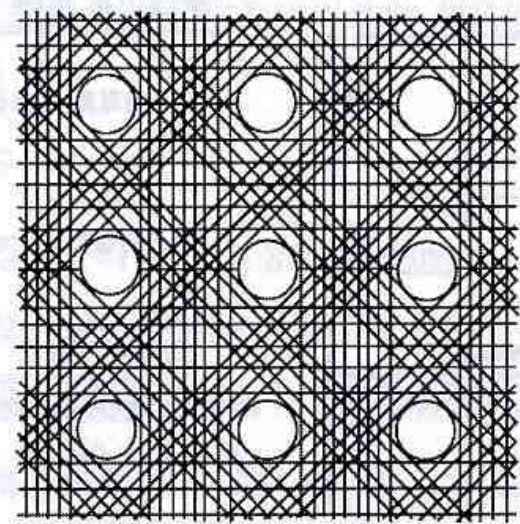


그림 33. 확대기초의 주철근 배근

(나) 방법 B

① 강관말뚝의 머리보강 방법의 공통사항은 다음과 같다.

- ㉠ 경사말뚝을 이용할 경우 확대기초에 말뚝이 근입되는 길이는 최소 10cm로 한다.
- ㉡ 철근 정착길이, L_d 가 철근의 인장력을 견딜 수 없을 경우 표준 갈고리를 사용할 수 있다.

② 강관말뚝의 속채움 콘크리트 방법(방법 B)의 구조세목 다음과 같다.

- ㉢ 말뚝본체 내의 미끌림 방지는 강관말뚝 방법 A를 따르기로 한다.
- ㉣ 미끌림 방지와 철근의 틈은 일반적으로 15mm이상, 말뚝과 철근의 틈은 철근지름 이상으로 한다.
- ㉤ 강관말뚝의 속채움 보강철근은 원칙적으로 철근을 두르는 방식을 따르기로 한다. 부득이하게 말뚝 바깥둘레에 보강철근을 용접하는 경우 SD30 또는 SD35의 철근을 사용함과 아울러 반드시 하나씩 확실히 용접해야 한다. 그 경우, 구조세목은 철근을 두르는 방식에 준한다.
- ㉬ 말뚝머리에 작용하는 하중을 충분히 저항하기 위하여 설계에 구한 말뚝머리 내부보강 깊이까지 묻은 흙 등과 같은 미물질은 깨끗이 청소한 후 콘크리트를 타설하여야 한다.
- ㉭ 콘크리트 타설시 다짐을 하여 골재분리 등 조잡 시공되지 않게 주의하여야 한다.

③ PSC, PHC 말뚝의 구조 세목 다음과 같다

㉔ 말뚝본체 내 보강철근을 배치할 경우 5.8.12.2의 규정에 따른다.

㉕ 가상철근콘크리트 단면에 의하여 조사할 경우 PSC 강재는 무시한다.

㉖ 보강철근의 정착길이는 강관말뚝 B 방법에 의한 것으로 한다. 말뚝머리를 잘라내는 경우 철근의 길이를 50ϕ 만큼 증가시키며 이 부분의 말뚝은 철근콘크리트 단면으로 취급한다. 이 경우에 PSC 강재는 무시하며 ϕ 는 PSC 강재의 지름(mm)이다. 말뚝체재에 보강철근을 배치하지 않고, 말뚝 내부의 빈 공간에만 배치하는 경우 구조상 말뚝머리 수평변위량을 강결합한 경우 1.2배가 되는 것으로 한다.

④ RC 말뚝의 구조세목은 PSC, PHC 말뚝에 준한다.

⑤ 현장타설말뚝의 구조세목은 아래 그림과 같다

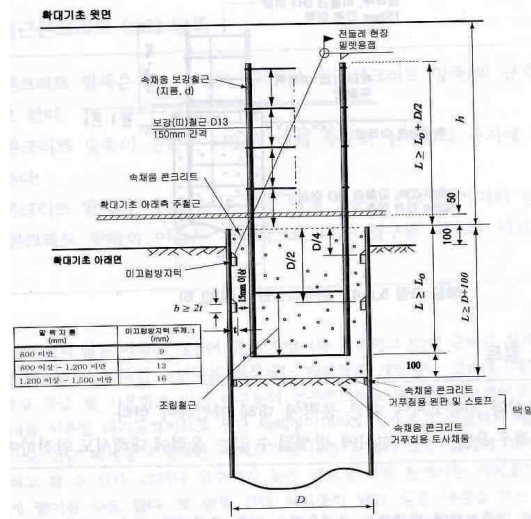


그림 34. 강관말뚝(방법 B)의 구조세목

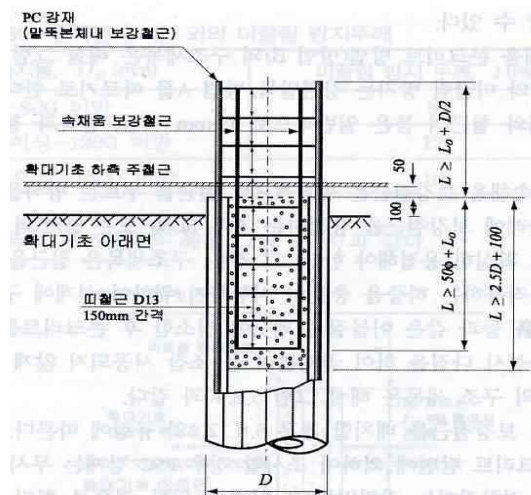


그림 35. PSC, PHC 말뚝, RC 말뚝(방법 B)

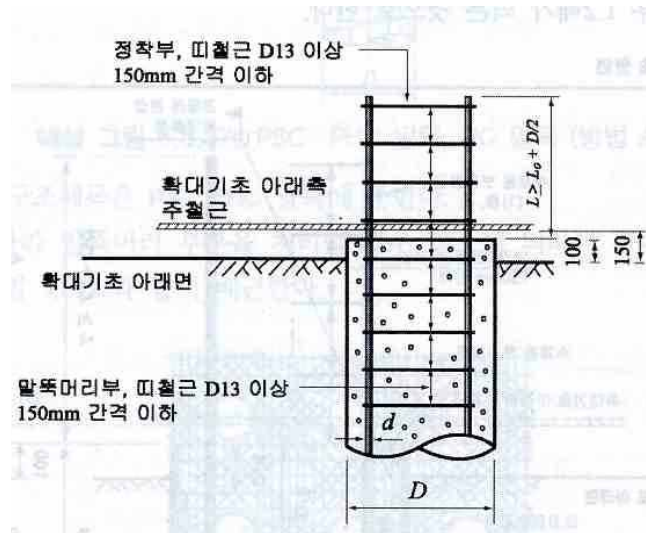
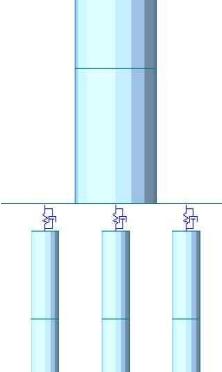
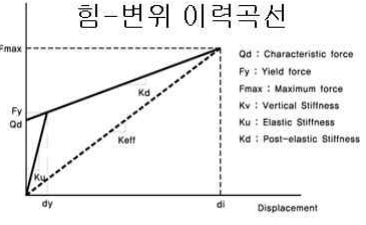


그림 36. 현장타설말뚝의 구조세목

제2절 구조물별 힌지 구조계 및 지진응답값 연구

경계조건에 따른 해석모델링은 기초고정 및 본 제품의 면진장치를 사용시 다양한 전단스프링 및 연직스프링은 실험결과를 토대로 하였다.

가. 경계조건

구 분	기초고정	지진격리장치		
		납면진받침 (LRB)	고감쇠고무받침 (HDRB)	면진형 디스크받침 (EDS)
구조적 형상				
경계 조건		  힘-변위 이력곡선 - Qd : Characteristic force - Fy : Yield force - Fmax : Maximum force - Kv : Vertical Stiffness - Ku : Elastic Stiffness - Kd : Post-elastic Stiffness		

1. 강상자형교 현지거동 연구

가. 설계개요

면진해석 대상교량인 마포대교 Ramp-A교는 총연장 128m이고 상부구조 형식은 강상형교이다. 강상형교는 도로교 및 철도교에 일반적으로 많이 시공되어지는 교량형식으로 전체구간을 내진해석을 수행하였다. 또한 면진 각 받침장치의 장단점을 비교 분석하고, 지진력 및 상부 변위 등을 비교하여 내진성능을 평가하였다.

나. 검토조건

(1) 일반사항

(가) 교량명 : 마포대교 RAMP-A교

(나) 교량경간 : 4@32=128m

(다) 상부형식 : 강상형교

(라) 하부형식 : 교각-T형 교각, 기초-확대기초(파일기초)

(마) 받침형식 :

① 납 면진받침(LRB)

② 고감쇠 고무받침(HDRB)

③ 면진형 디스크받침(EDS)

(2) 내진등급 : 내진 1등급 교량

(3) 내진 조건

(가) 지진구역 : I

(나) 지진구역계수 : 0.11

(다) 위험도계수 : 1.4(재현주기 1000년 적용)

(라) 가속도계수(A) : 0.154g

(마) 지반종류 : Soil Type-III (S=2.0 내진)

- (4) 적용 지진하중 (지진파)
 (가) 내진해석 : 탄성지진파

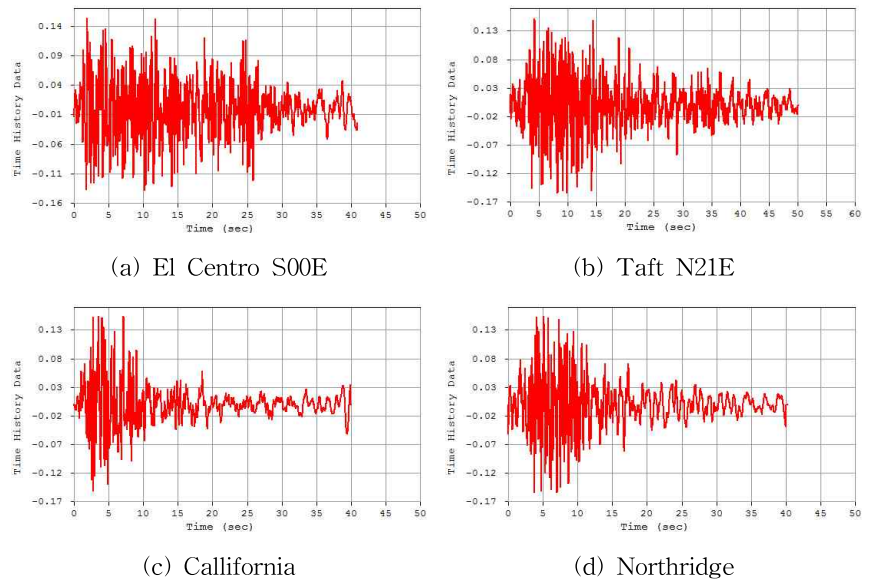


표 13. 입력 지진파

- (5) 해석방법 : 시간이력해석법
 (6) 설계응답스펙트럼

도로교설계기준에 제시된 지반TYPE III에 해당되는 $S=2.0$ 의 설계응답스펙트럼 적용

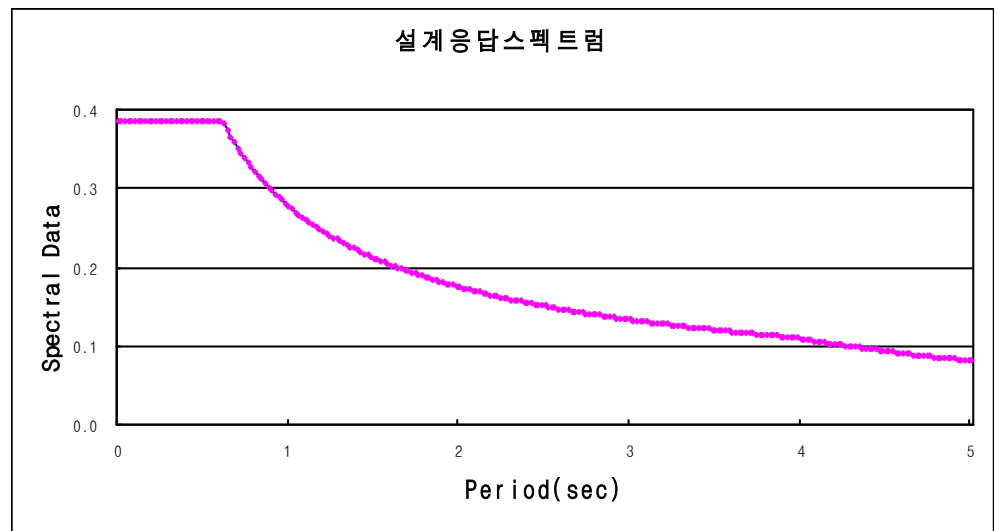


그림 37. 설계응답스펙트럼

다. 해석모델링

(1) 상·하부구조 모델링

상부구조는 분포 질량의 관성력을 각 절점들의 위치에서 적절하게 분배하기 위해 보요소(beam element)로 거더의 도심을 지나는 격자로 모델링 하였다. 하부구조는 교각 기둥과 코핑을 보요소로 모델링 하고, 기초의 도심을 고정단 위치로 정하였다.

(2) 연결부 모델링

상부구조의 도심과 주형하단까지는 RIGID요소로 모델링하여 연결부를 형성하였고, 교대는 구체 및 뒷채움 흙의 영향은 고려하지 않았으며, 실제 받침의 배치상태를 고려하여 탄성 스프링요소를 사용하여 모델링 하였다. 교각은 주형하단과 교각상단 사이에 실제 받침의 배치상태를 고려하여 탄성스프링(NNLINK 요소)으로 모델링 하였다.

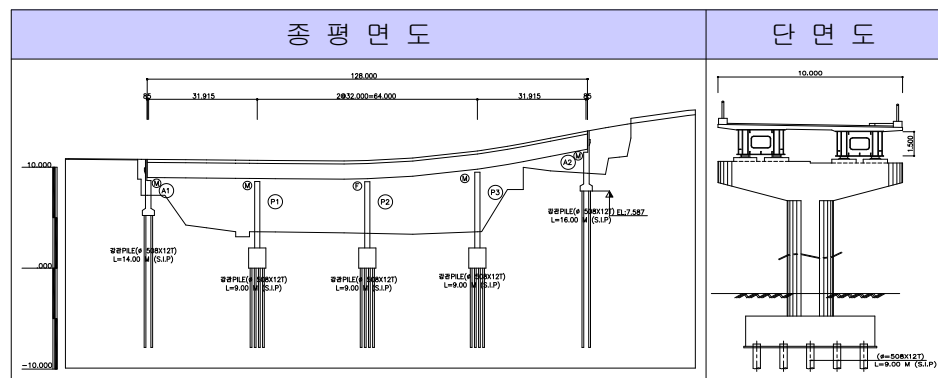


표 12. 대상교량

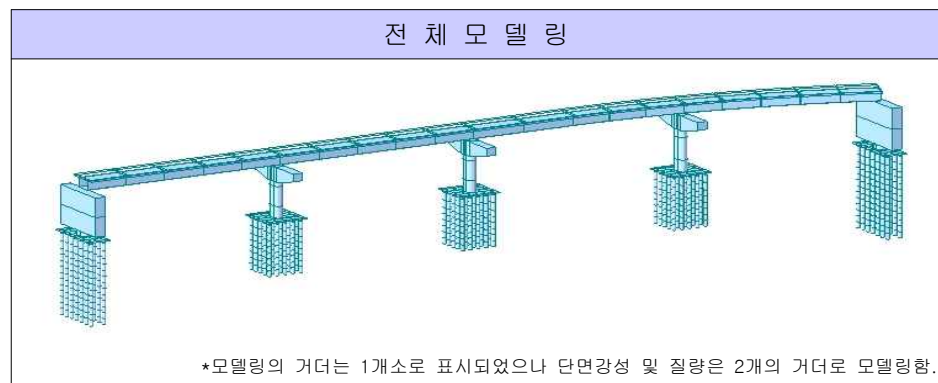


표 13. 전체 모델링

라. 내진 및 면진해석 결과

(1) 지진력의 조합

하중조합 1 = 1.0×종방향축 해석+0.3×횡방향축 해석

하중조합 2 = 0.3×종방향축 해석+1.0×횡방향축 해석

(2) 내진 해석(기준상태-포트받침)

(가) 교량받침 설계전단력

PIER NO.	하중조합 1		하중조합 2	
	교축(kN)	교축직각(kN)	교축(kN)	교축직각(kN)
P1 (말뚝기초)	0	102.58	0	302.45
P2 (말뚝기초)	0	131.37	0	362.57
P3 (말뚝기초)	1481.45	156.86	484.62	444.40
P4 (말뚝기초)	0	133.63	0	374.10
P5 (말뚝기초)	0	110.52	0	277.76

(나) 기둥 부재력

PIER NO.	하중조합	축력(kN)	전단력(kN)		모멘트(kN·m)	
			교축	교축직각	교축	교축직각
P1 (말뚝기초)	COM1	46.67	1063.43	364.8	4915.64	1668.02
	COM2	35.75	319.46	1176.45	1479.90	5355.78
P2 (말뚝기초)	COM1	89.67	783.01	201.02	4518.05	1370.49
	COM2	77.43	235.21	608.2	1363.92	4121.19
P3 (말뚝기초)	COM1	219.33	1734.51	220.27	11314.56	1386.72
	COM2	446.97	571.65	632.15	3724.84	3927.51
P4 (말뚝기초)	COM1	297.92	634.72	177.87	4695.58	1264.11
	COM2	811.67	190.65	536.35	1416.83	3811.46
P5 (말뚝기초)	COM1	150.41	1132.47	341.94	5436.89	1561.09
	COM2	389.43	340.76	1023.08	1640.15	4508.84

(3) 먼진 해석

(가) 납 먼진받침(LRB)

① 교량받침 설계전단력

PIER NO.	하중조합 1		하중조합 2	
	교축(kN)	교축직각(kN)	교축(kN)	교축직각(kN)
P1 (말뚝기초)	0	146.12	0	307.49
P2 (말뚝기초)	0	167.89	0	389.61
P3 (말뚝기초)	912.77	174.13	314.49	374.66
P4 (말뚝기초)	0	200.21	0	378.90
P5 (말뚝기초)	0	107.74	0	206.90

② 말뚝면진받침 설계전단력

PIER NO.	하중조합 1		하중조합 2	
	교축(kN)	교축직각(kN)	교축(kN)	교축직각(kN)
P1 (말뚝기초)	52.72	24.49	17.55	66.28
P2 (말뚝기초)	34.91	14.17	13.37	41.29
P3 (말뚝기초)	52.21	15.19	19.40	44.89
P4 (말뚝기초)	37.62	14.34	14.89	42.21
P5 (말뚝기초)	57.98	23.52	17.90	58.34

③ 기둥 부재력

PIER NO.	하중조합	축력(kN)	전단력(kN)		모멘트(kN·m)	
			교축	교축직각	교축	교축직각
P1 (말뚝기초)	COM1	301.13	437.17	203.63	2456.70	898.93
	COM2	149.54	136.19	526.71	761.54	2401.14
P1 (말뚝기초)	COM1	607.45	586.01	169.29	3730.19	1251.5
	COM2	308.14	209.06	501.32	1337.59	3580.52
P1 (말뚝기초)	COM1	648.28	1068.07	180.87	7065.91	1563.74
	COM2	550.28	365.46	544.40	2435.07	4371.47
P1 (말뚝기초)	COM1	976.01	495.25	178.03	3635.19	1357.61
	COM2	974.01	183.54	505.51	1352.69	3818.61
P1 (말뚝기초)	COM1	681.78	516.67	201.04	2696.28	1197.86
	COM2	565.94	157.04	528.08	820.39	2736.95

(나) 고감쇠 고무받침(HDRB)

① 교량받침 설계전단력

PIER NO.	하중조합 1		하중조합 2	
	교축(kN)	교축직각(kN)	교축(kN)	교축직각(kN)
P1 (말뚝기초)	0	116.18	0	298.37
P2 (말뚝기초)	0	154.26	0	394.14
P3 (말뚝기초)	968.22	150.28	329.42	375.81
P4 (말뚝기초)	0	158.40	0	365.86
P5 (말뚝기초)	0	89.21	0	226.21

② 말뚝면진받침 설계전단력

PIER NO.	하중조합 1		하중조합 2	
	교축(kN)	교축직각(kN)	교축(kN)	교축직각(kN)
P1 (말뚝기초)	56.95	22.77	17.63	69.12
P2 (말뚝기초)	57.21	20.94	17.39	60.19
P3 (말뚝기초)	36.77	13.88	12.03	39.48
P4 (말뚝기초)	50.44	14.02	17.77	42.21
P5 (말뚝기초)	37.21	11.86	13.25	36.08

③ 기둥 부재력

PIER NO.	하중조합	축력(kN)	전단력(kN)		모멘트(kN·m)	
			교축	교축직각	교축	교축직각
P1 (말뚝기초)	COM1	148.55	543.54	237.57	2279.78	1007.85
	COM2	80.83	164.86	688.25	701.29	2827.79
P2 (말뚝기초)	COM1	320.65	588.06	175.24	3487.83	1200.83
	COM2	169.02	189.24	535.41	1127.29	3526.02
P3 (말뚝기초)	COM1	429.63	1161.47	177.87	7614.59	1398.68
	COM2	473.46	391.89	550.25	2579.04	4172.15
P4 (말뚝기초)	COM1	644.66	517.22	168.04	3362.08	1284.48
	COM2	903.30	171.20	513.74	1137.53	3871.20
P5 (말뚝기초)	COM1	409.05	542.95	214.45	2511.74	1029.81
	COM2	440.24	163.60	627.7	759.14	2730.75

(다) 면진형 디스크받침(EDS)

① 교량받침 설계전단력

PIER NO.	하중조합 1		하중조합 2	
	교축(kN)	교축직각(kN)	교축(kN)	교축직각(kN)
P1 (말뚝기초)	0	107.56	0	311.60
P2 (말뚝기초)	0	153.85	0	455.76
P3 (말뚝기초)	864.68	137.02	304.56	360.33
P4 (말뚝기초)	0	154.42	0	400.66
P5 (말뚝기초)	0	85.46	0	239.15

② 말뚝면진받침 설계전단력

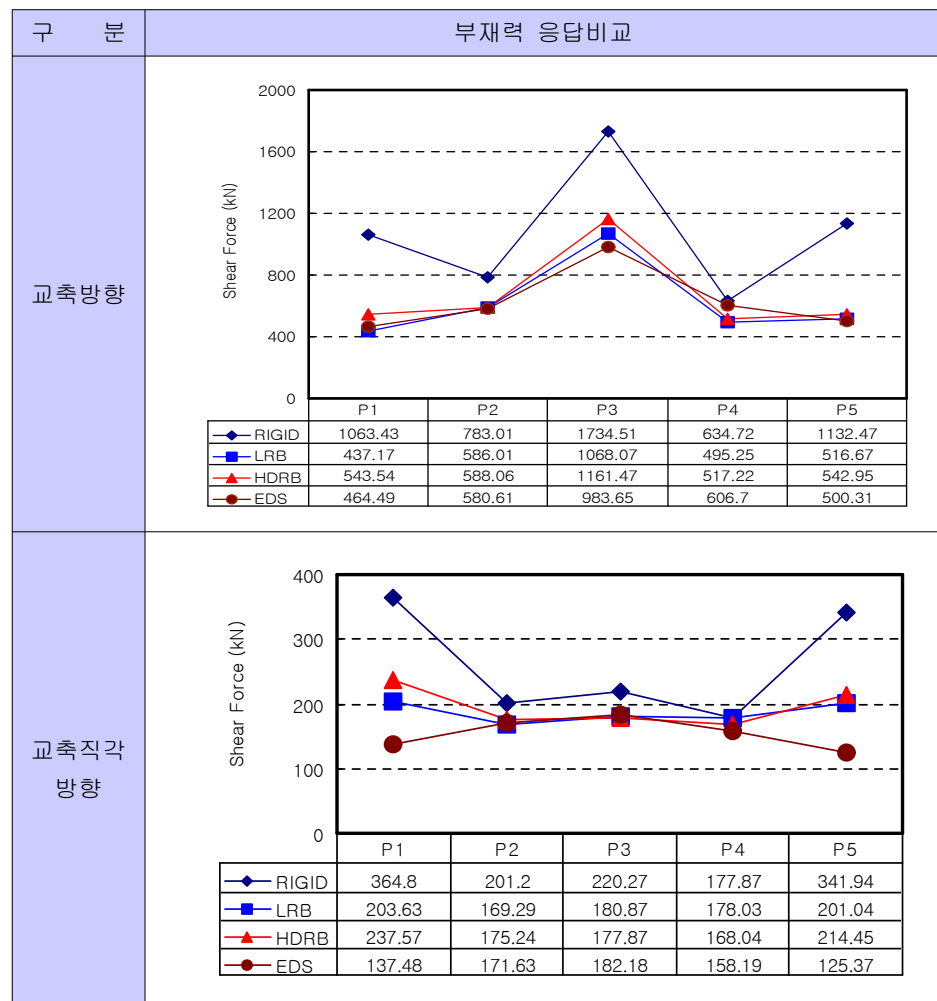
PIER NO.	하중조합 1		하중조합 2	
	교축(kN)	교축직각(kN)	교축(kN)	교축직각(kN)
P1 (말뚝기초)	35.83	11.82	10.94	35.91
P2 (말뚝기초)	35.63	13.08	10.75	35.96
P3 (말뚝기초)	33.69	10.47	10.26	32.59
P4 (말뚝기초)	36.45	11.03	13.81	34.23
P5 (말뚝기초)	33.63	10.20	10.35	31.93

③ 기둥 부재력

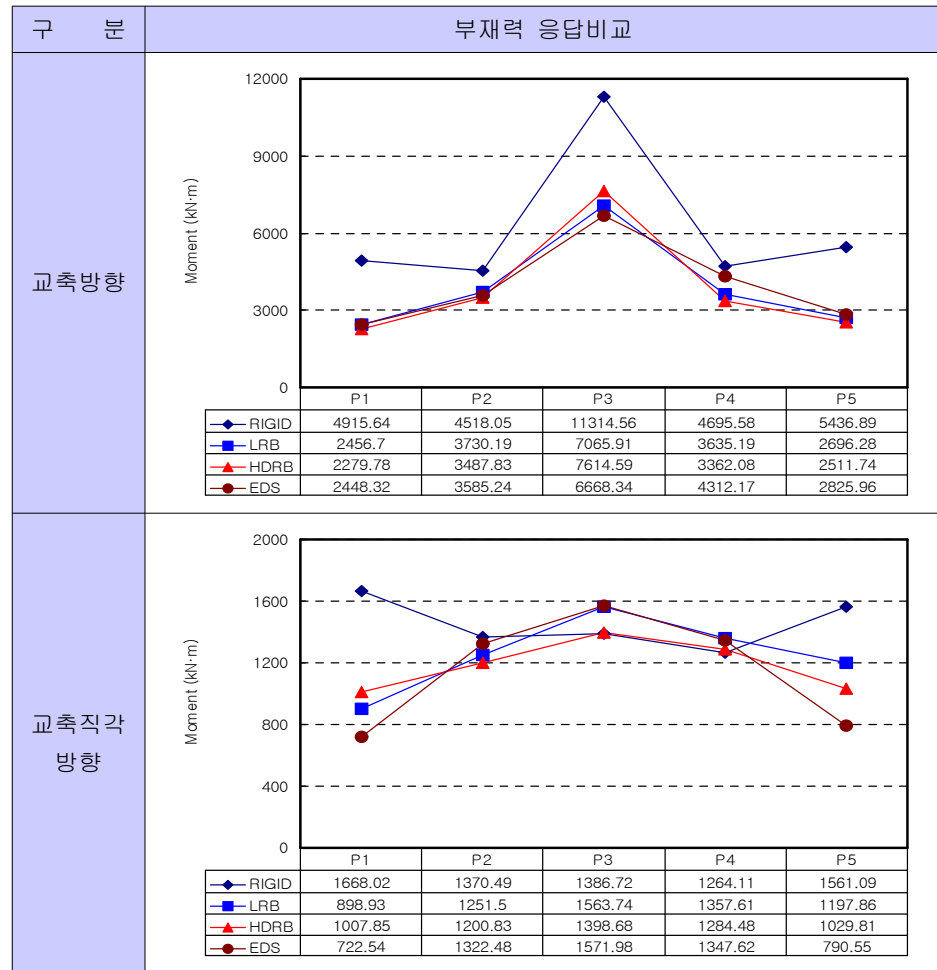
PIER NO.	하중조합	축력 (kN)	전단력(kN)		모멘트(kN·m)	
			교축	교축직각	교축	교축직각
P1 (말뚝기초)	COM1	107.36	464.49	137.48	2448.32	722.54
	COM2	64.95	140.61	403.74	742.76	2107.82
P2 (말뚝기초)	COM1	289.33	580.61	171.63	3585.24	1322.48
	COM2	190.39	176.53	538.89	1091.61	4096.32
P3 (말뚝기초)	COM1	369.88	983.65	182.18	6668.34	1571.98
	COM2	507.13	347.81	567.6	2363.17	4765.13
P4 (말뚝기초)	COM1	587.78	606.7	158.19	4312.17	1347.62
	COM2	835.22	185.2	474.31	1316.95	4115.27
P5 (말뚝기초)	COM1	345.26	500.31	125.37	2825.96	790.55
	COM2	498.28	150.36	359.11	849.67	2102.32

마. 해석결과 부재력 응답

(1) 기둥의 전단력

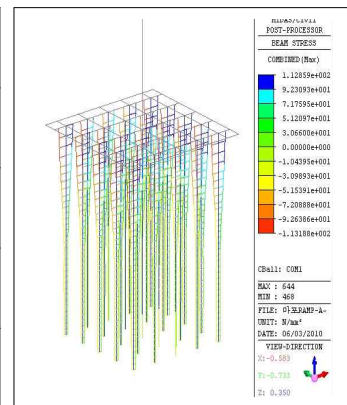


(2) 기둥의 모멘트



(3) 힌지거동에 따른 말뚝본체 검토(말뚝응력검토)

구분	발생응력 (MPa)	허용응력 (MPa)	검토
기초고정	113.1	140	OK
말뚝두부면진 (LRB)	36.7	140	OK
말뚝두부면진 (HDRB)	41.1	140	OK
말뚝두부면진 (EDS)	27.0	140	OK



(가) 말뚝두부면진장치 적용시 말뚝에 작용하는 응력감소율은 최대 76.1%

바. 해석결과 분석

본 절에서는 교각하단과 적용받침에 대한 지진시 응답을 교축방향, 교축 직각방향에 대해 나타내고 각 결과들을 분석하였다. 말뚝두부에 설치되는 지진격리받침으로는 고감쇠 고무받침(HDRB)과 납 면진받침(LRB), 면진형 디스크받침(EDS)을 대상으로 해석하였다.

(1) 교각하단의 전단력

교각하단의 전단력이란 교각의 기둥과 확대기초가 접하는 부분의 전단력을 의미하며, 받침을 통해 전달되는 상부구조의 자중에 의한 관성력과 기둥 자체의 관성력이 조합되어 나타난다. 교각 하단의 전단력 응답을 살펴보면 다음과 같다.

(가) 기존 받침인 포트받침의 경우 교량의 고유주기가 짧아 유발되는 전체 관성력이 크므로 받침에 상대적으로 큰 변위가 유발되는 전체 관성력이 커지므로 받침에 상대적으로 큰 힘이 집중되었다.

(나) 지진격리받침을 사용한 경우의 경우 교량의 고유주기가 충분히 길고 전체적인 분산기능과 감쇠기능에 의해 포트받침에 비해 저감효과가 탁월한 것으로 나타났다.

(다) 교축방향 및 교축직각방향 모두 지진격리받침을 사용할 경우 기둥부에서 발생하는 전단력이 저감되었으며, 모든 교각에서 하중이 고르게 분배되어 외부에너지 저감효과가 우수함을 알 수 있다.

(2) 교각하단의 모멘트

교각하단의 모멘트란 교각의 기둥과 확대기초가 접하는 부분의 전단력을 의미하며, 받침을 통해 전달되는 상부구조 자중에 의한 관성력과 기둥자체의 관성력이 조합되어 나타난다. 이것에 따라 기둥의 지진에 대한 설계방법(탄성설계 또는 소성설계)이 결정되고, 종철근량과 심부구속 철근량이 달라지므로 하부구조 공사비와 밀접한 관련을 갖는다. 교각하단의 모멘트 응답을 살펴보면 다음과 같다.

(가) 기존 설계법에 의한 경우(탄성받침) 교량의 고유주기가 짧아 유발되는 전체 관성력이 크므로 받침에 상대적으로 큰 변위가 유발되는 전체 관성력이 커지므로 받침에 상대적으로 큰 힘이 집중되었다. 따라서 받침의 자재비가 증가하며 받침 저판의 연단거리가 기준치를 초과할 우려가 있다.

(나) 지진격리받침을 적용한 경우 교량의 고유주기가 충분히 길고 전체적인 분산기능과 감쇠기능에 의해 모멘트분포가 고르고, 기존 설계법에 비해 에너지 소산력이 뛰어나 지진력 저감효과가 매우 우수함을 알 수 있으며, 인접교각의 길이차로 인한 지진력 집중에 대한 영향은 거의 없는 것으로 나타났다.

(다) 교축직각방향에서는 교각하단부에 발생하는 모멘트는 기존 설계법에 비해 납 면진받침과 면진형 디스크받침의 경우 다소 높게 분포되었다. 그러나 그 정도가 적고 다른 교각으로 에너지 분산되어 그 영향이 적은 것으로 판단된다.

(라) 경제성 분석

구 분	기존	말뚝두부 면진장치 적용시
단 면 도		
PM상관도		
설계방법	소성설계 띠철근 및 보강철근(H22@75)	탄성설계 띠철근 및 보강철근(H16, H13 @300)
철근공사비	축방향철근 + 소성 띠철근 101,880,000원	축방향 철근 + 띠철근 51,736,000원
말뚝두부 면진장치 적용유무	일반 두부 장치 21,750,000원	면진두부장치 75,000,000원
교량받침 수평력감소	-	-29,000,000원
계	123,630,000원	97,736,000원 (-25,894,000원)
유지보수시	교량받침 교체비 약1.2억원 예상	말뚝두부면진 전면 교체시 1.1억원 예상

2. PSC 빔교 현지거동 연구

가. 설계개요

면진해석 대상교량인 암기교(영천~상주간 고속도로)는 총연장 180m이고 상부구조 형식은 PSC빔교이다. PSC빔교는 도로교 및 철도교에 일반적으로 많이 시공되어지는 교량형식으로 전체구간을 내진해석을 수행하였다.

또한 면진 각 받침장치의 장단점을 비교 분석하고, 지진력 및 상부 변위 등을 비교하여 내진성능을 평가하였다.

본 교량은 말뚝기초와 직접기초가 혼용된 교량으로서, 교량받침 및 말뚝 면진에 대한 지진시 응답을 교축방향, 교축직각방향에 대해 나타내고 각 결과들을 분석하기로 한다.

당초 암기교는 PSC 빔거더교이면서도 면진받침을 사용한 결과, 면진받침과 기초(말뚝,직접)면진장치가 없는 경우에 대하여 먼저 응답값을 분석하였다.

나. 검토조건

(1) 일반사항

(가) 교 량 명 : 암기교

(나) 교량경간 : $4@45=180.0\text{m}$

(다) 상부형식 : PSC빔교

(라) 하부형식 : 교각-T형 교각, 기초-직접기초 및 파일기초

(마) 받침조건 :

① 받침 면진

② 받침 면진, 말뚝 면진

③ 받침 내진, 말뚝 면진

(2) 내진등급 : 내진 1등급 교량

(3) 내진 조건

(가) 지진구역 : I

(나) 지진구역계수 : 0.11

(다) 위험도계수 : 1.4(재현주기 1000년 적용)

(라) 가속도계수(A) : $0.154g$

(마) 지반종류 : Soil Type-III (S=2.0 내진)

- (4) 적용 지진하중 (지진파)
 (가) 내진해석 : 탄성지진파

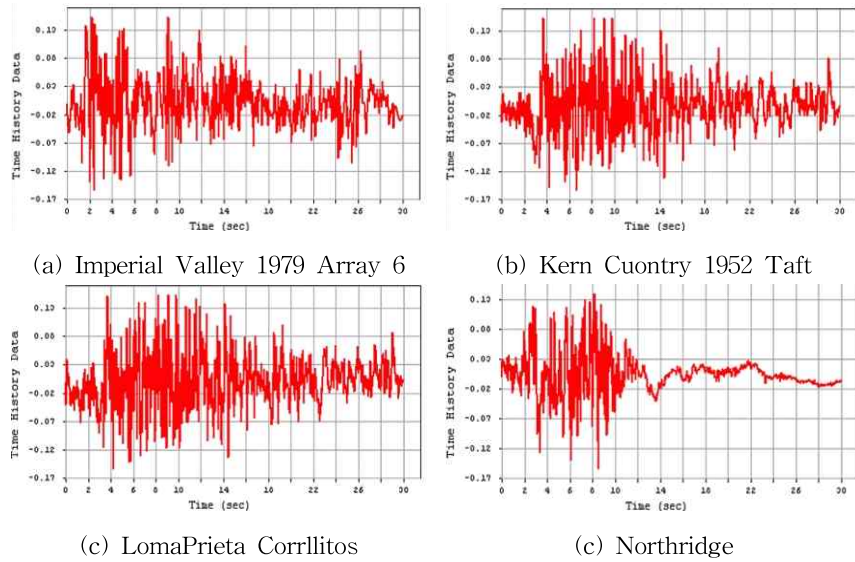


표 14. 입력지진파

- (5) 해석방법 : 시간이력해석법
 (6) 설계응답스펙트럼

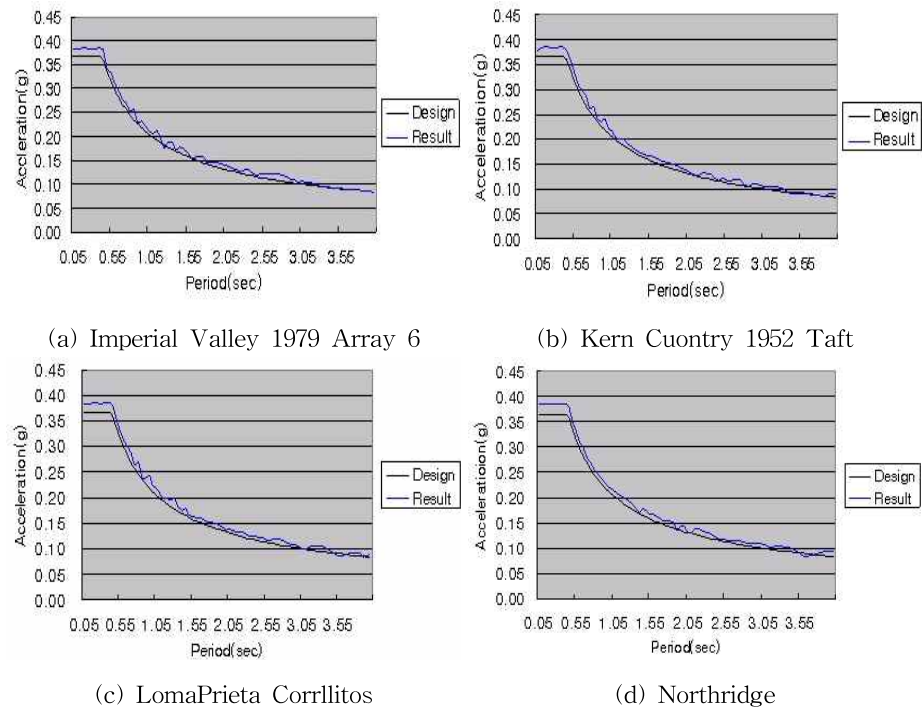


표 15. 설계응답스펙트럼

다. 해석모델링

(1) 상·하부구조 모델링

상부구조는 분포 질량의 관성력을 각 절점들의 위치에서 적절하게 분배하기 위해 보요소(beam element)로 거더의 도심을 지나는 격자로 모델링 하였다. 하부구조는 교각 기둥과 코핑,말뚝은 보요소로 모델링하고, 기초는 판모델링 하였다.

(2) 연결부 모델링

받침조건은 3가지의 경우로 나누어 비교 검토하였다.

(가) 받침 면진

(나) 받침 면진, 말뚝 면진

(다) 받침 내진, 말뚝 면진

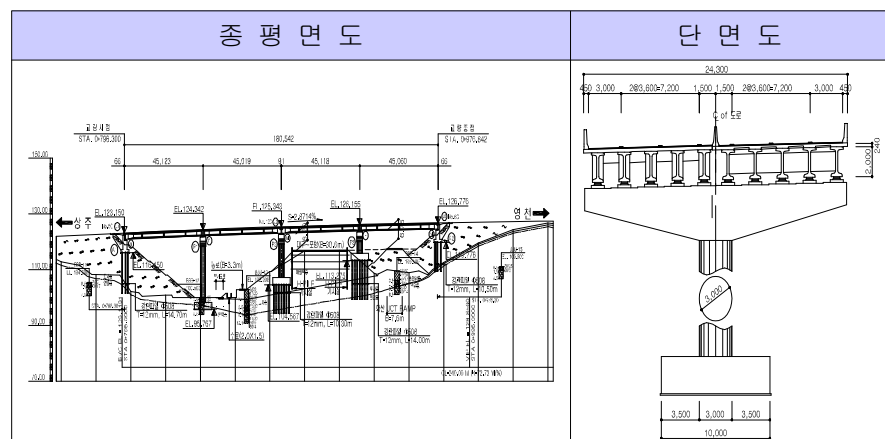


표 16. 대상교량

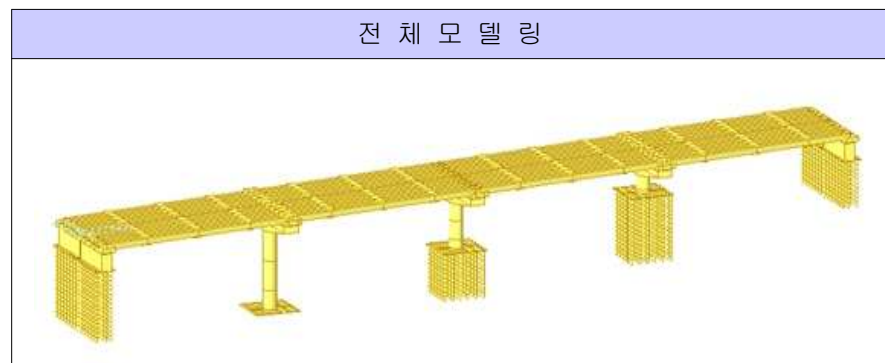


표 17. 전체 모델링

라. 내진 및 면진 해석 결과

(1) 지진력의 조합

하중조합 1 = 1.0×종방향축 해석+0.3×횡방향축 해석

하중조합 2 = 0.3×종방향축 해석+1.0×횡방향축 해석

(2) 받침면진

(가) 교량받침 설계전단력

PIER NO.	하중조합 1		하중조합 2	
	교축(kN)	교축직각(kN)	교축(kN)	교축직각(kN)
A1 (말뚝기초)	190.08	52.87	88.66	139.63
P1 (직접기초)	105.02	37.68	68.42	81.87
P2 (말뚝기초)	148.61	69.76	76.92	187.66
P3 (말뚝기초)	126.82	44.62	72.72	105.90
A2 (말뚝기초)	131.63	46.43	64.44	117.08

(나) 기둥 부재력

PIER NO.		Frame	하중조합	전단력(kN)		모멘트(kN·m)	
				교축	교축직각	교축	교축직각
P1 (직접기초)	상단	293	COM1	2216	1217	15642	11466
		293	COM2	1031	3027	7337	29942
	하단	95	COM1	2277	997	32684	16646
		95	COM2	950	2213	14498	41246
P2 (말뚝기초)	상단	295	COM1	2696	1351	13742	9127
		295	COM2	1124	3290	6298	23125
	하단	96	COM1	2295	1214	29030	17151
		96	COM2	1076	3016	13470	44977
P3 (말뚝기초)	상단	287	COM1	2526	1136	5034	9212
		287	COM2	1077	2746	2636	23668
	하단	97	COM1	2772	1422	15459	9247
		97	COM2	1142	3473	7015	23347

(3) 받침면진, 말뚝 면진

(가) 교량받침 설계전단력

PIER NO.	하중조합 1		하중조합 2	
	교축(kN)	교축직각(kN)	교축(kN)	교축직각(kN)
A1 (말뚝기초)	162.30	50.05	84.02	124.75
P1 (직접기초)	94.61	34.31	67.63	75.03
P2 (말뚝기초)	127.50	59.22	62.80	155.69
P3 (말뚝기초)	116.27	41.76	65.48	99.09
A2 (말뚝기초)	128.96	43.02	68.79	101.70

(나) 기둥 부재력

PIER NO.		Frame	하중조합	전단력(kN)		모멘트(kN·m)	
				교축	교축직각	교축	교축직각
P1 (직접기초)	상단	293	COM1	2125	853	15208	10627
		293	COM2	970	2218	7026	28590
	하단	95	COM1	1717	688	25650	14512
		95	COM2	696	1486	11478	36481
P2 (말뚝기초)	상단	295	COM1	1475	674	8914	8273
		295	COM2	615	1560	4269	20773
	하단	96	COM1	1491	754	25451	14618
		96	COM2	704	2079	11718	38637
P3 (말뚝기초)	상단	287	COM1	1659	639	4013	7079
		287	COM2	699	1470	2292	17773
	하단	97	COM1	1375	678	9826	8589
		97	COM2	578	1568	4636	21660

(4) 받침내진, 말뚝 면진

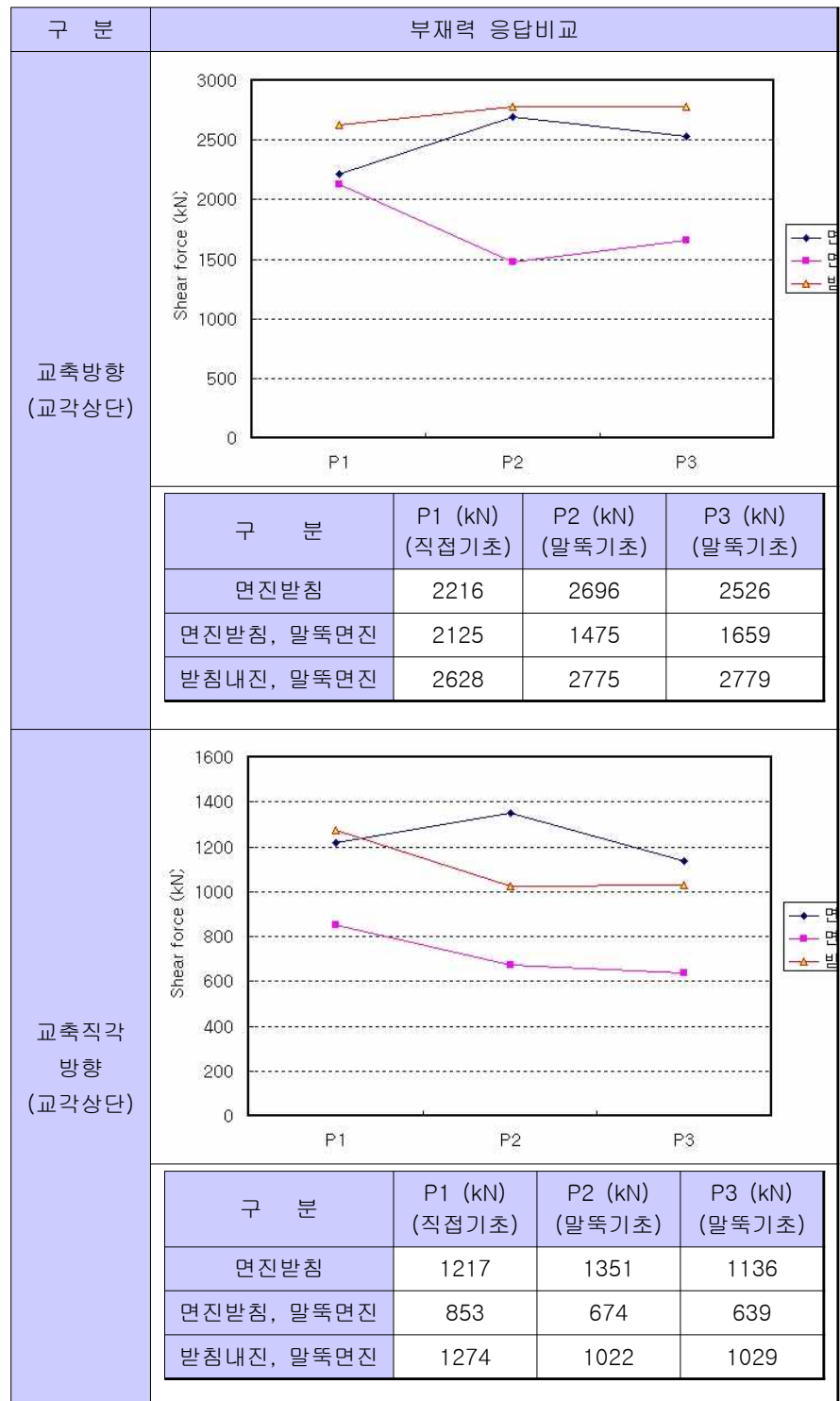
(가) 교량받침 설계전단력

PIER NO.	하중조합 1		하중조합 2	
	교축(kN)	교축직각(kN)	교축(kN)	교축직각(kN)
A1 (말뚝기초)	235.43	64.70	84.55	177.14
P1 (직접기초)	101.78	29.31	54.69	71.26
P2 (말뚝기초)	177.21	68.34	74.45	197.10
P3 (말뚝기초)	150.26	46.13	63.29	122.68
A2 (말뚝기초)	183.48	59.05	76.84	164.80

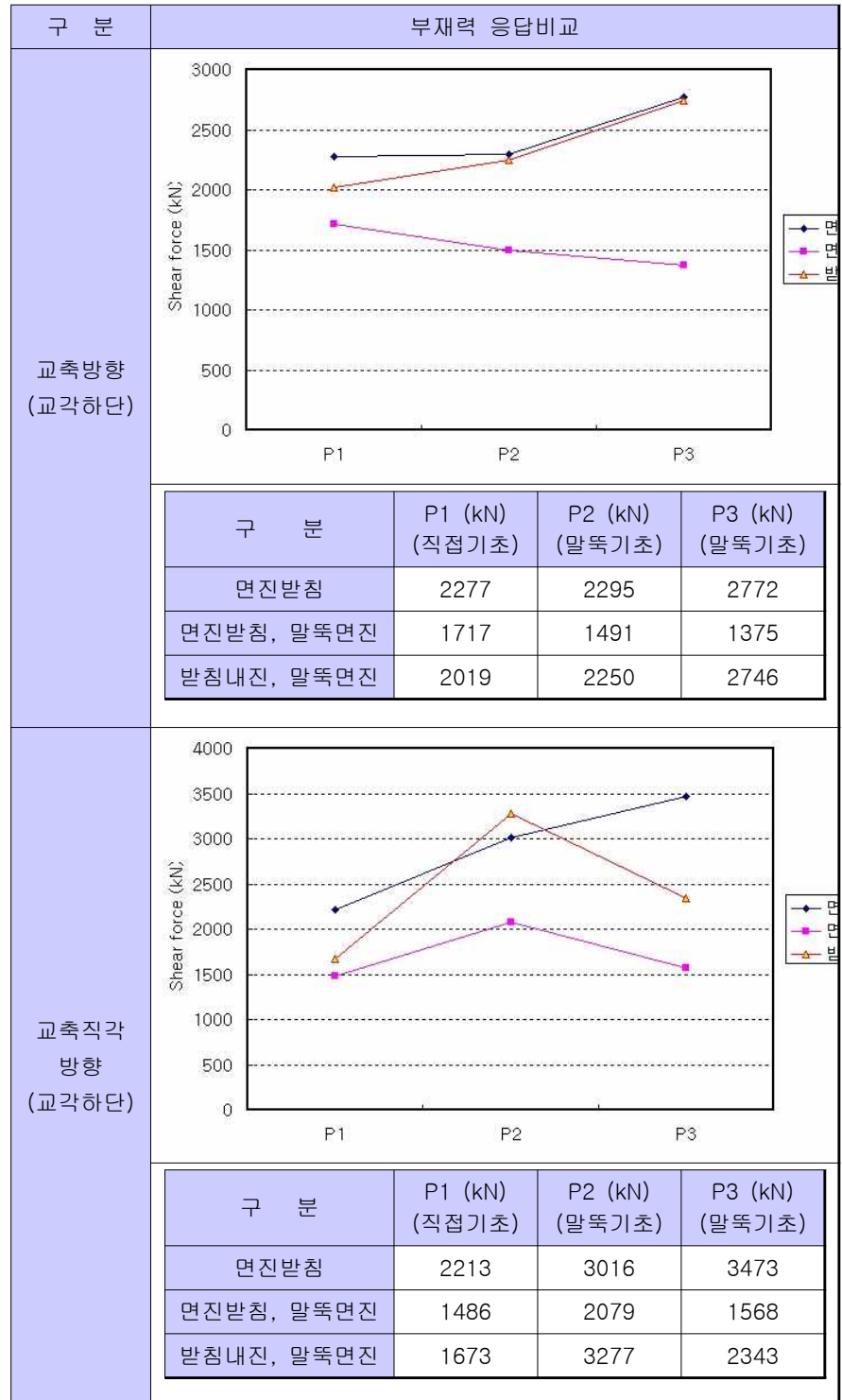
(나) 기둥 부재력

PIER NO.		Frame	하중조합	전단력(kN)		모멘트(kN·m)	
				교축	교축직각	교축	교축직각
P1 (직접기초)	상단	293	COM1	2628	1274	19584	12937
		293	COM2	1204	3236	8967	33513
	하단	95	COM1	2019	775	36379	16262
		95	COM2	801	1673	15270	38912
P2 (말뚝기초)	상단	295	COM1	2775	1022	16587	11805
		295	COM2	1111	2354	6994	25877
	하단	96	COM1	2250	1235	33816	19413
		96	COM2	1080	3277	15587	50569
P3 (말뚝기초)	상단	287	COM1	2779	1029	7614	9546
		287	COM2	1120	2352	3375	18382
	하단	97	COM1	2764	1016	18411	12247
		97	COM2	1101	2343	7722	27368

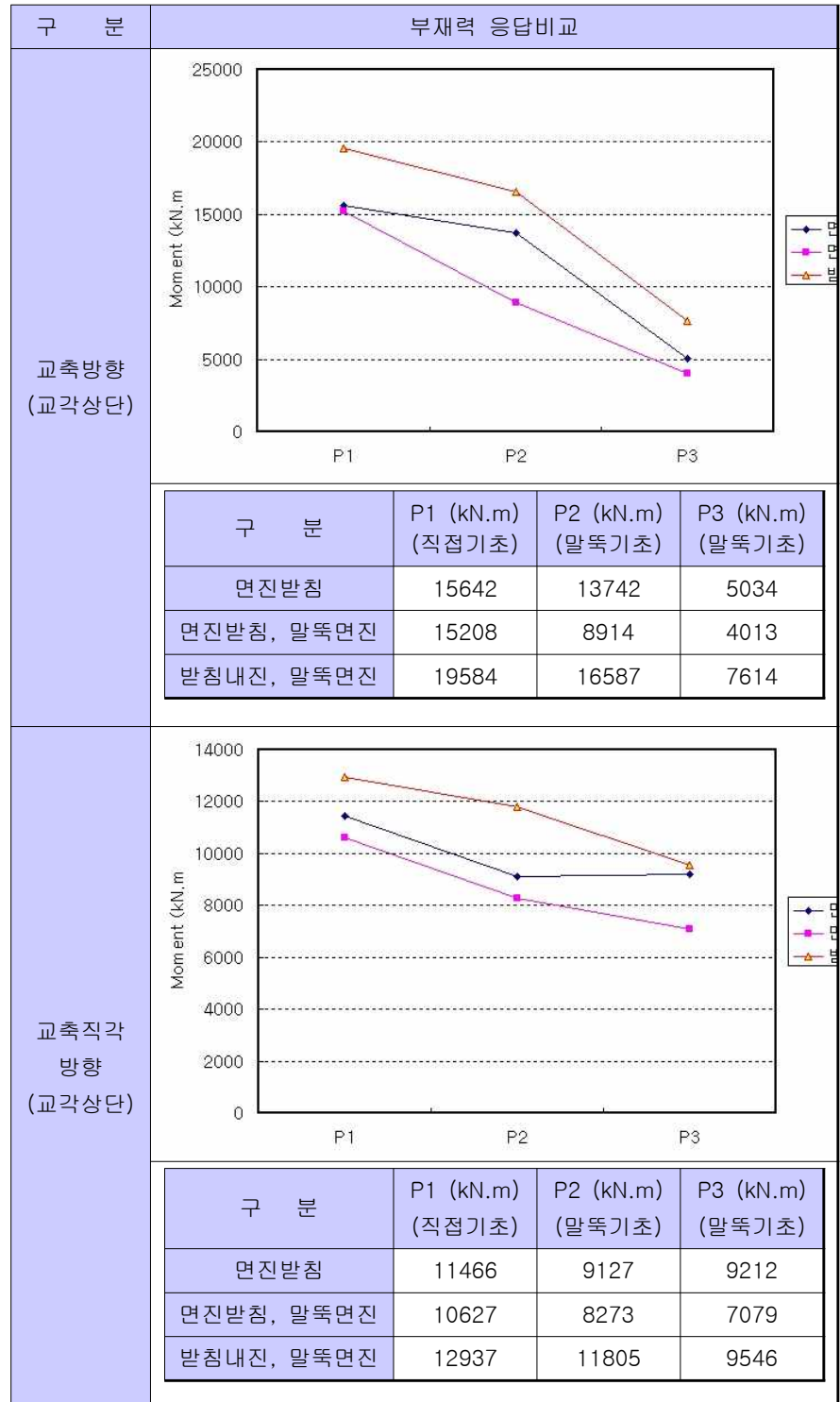
(5) 해석결과 부재력 응답
(가) 기둥의 전단력 (교각상단)



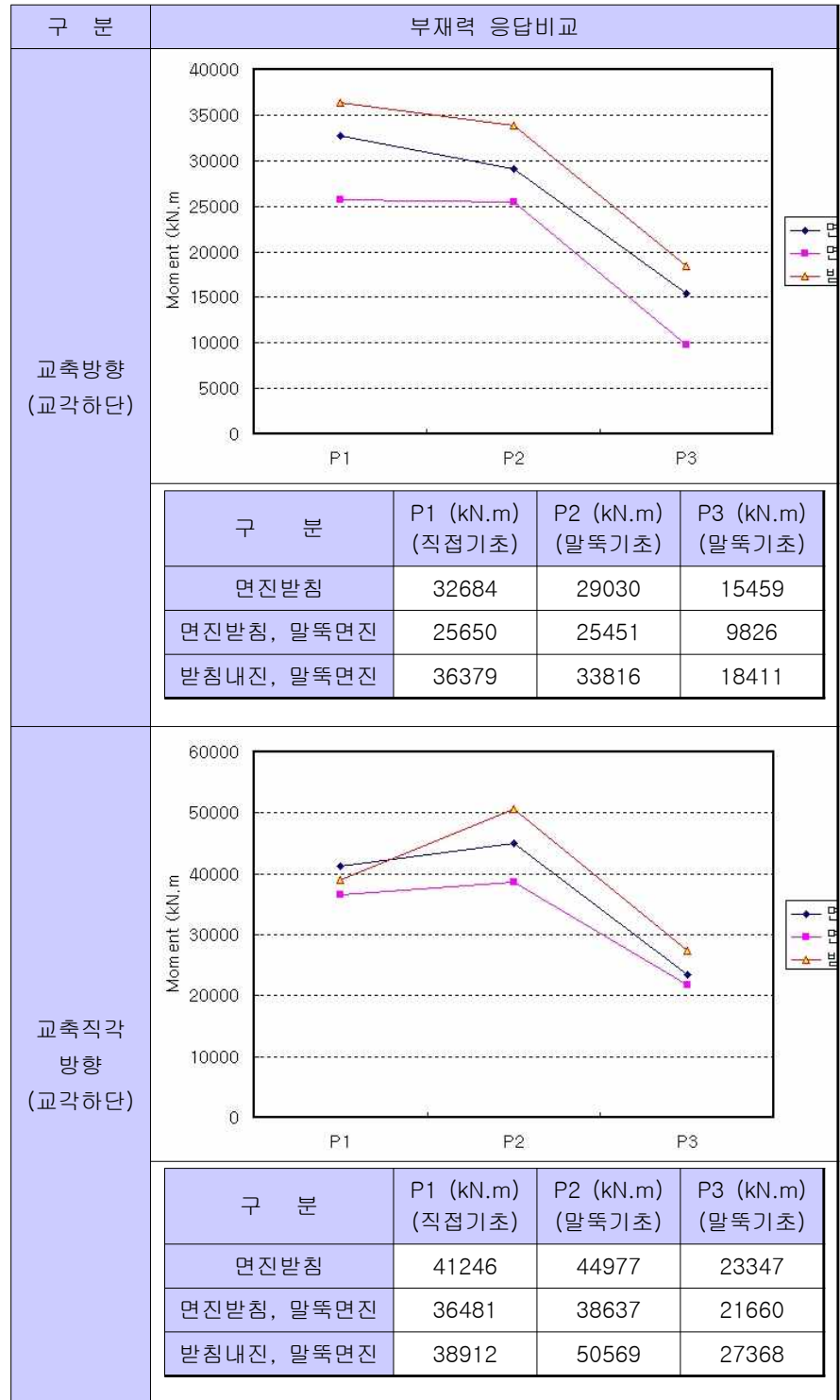
(나) 기둥의 전단력 (교각하단)



(다) 기둥의 모멘트 (교각상단)



(라) 기둥의 모멘트 (교각하단)



마. 해석결과 분석

본 절에서는 말뚝기초와 직접기초가 혼용된 교량에 대하여 교량받침 및 말뚝 면진에 대한 지진시 응답을 교축방향, 교축직각방향에 대해 나타내고 각 결과들을 분석하였다.

당초 암기교는 PSC 빔교이면서도 면진받침을 사용한 결과, 교량받침 장치에 면진받침과 면진장치가 없는 경우에 대하여 먼저 응답값을 분석하였다.

- (1) 교량면진받침, 기초(말뚝,직접기초) 면진 없음
- (2) 교량면진받침, 기초(말뚝,직접기초)면진
- (3) 교량내진받침, 기초(말뚝,직접기초)면진의 3가지 조건에 대하여 비교 분석하였다.

상기 3가지 경우의 구조검토 결과는 다음과 같다.

- (4) 교축방향 및 교축직각방향 모두 교량면진받침과 기초(말뚝,직접기초) 면진을 사용할 경우 기둥부에서 발생하는 전단력과 모멘트가 저감되었으며, 모든 교각에서 하중이 고르게 분배되어 외부에너지 저감효과가 우수함을 알 수 있다.
- (5) 교량면진받침과 기초(말뚝,직접기초) 면진을 적용한 경우 교량의 고유주기가 충분히 길고 전체적인 분산기능과 감쇠기능에 의해 모멘트분포가 고르고, 기존 설계법에 비해 에너지 소산력이 뛰어나 지진력 저감효과가 매우 우수함을 알 수 있다.
- (6) 경제적인 경우로서 ③의 경우인 교량내진받침과 기초(말뚝,직접기초) 면진을 적용한 경우를 검토한 결과 ①,②에 비해 기둥상,하부에 작용하는 단면력이 다소 크게 나왔으나, 가격이 높은 교량면진받침을 사용하지 않고서 교량내진받침을 사용하여 상대적으로 그다지 크지 않는 단면력 응답값이 산출되었으므로, 하부구조의 경제성 우위를 확보한 것으로 판단된다

(7) 경제성 분석

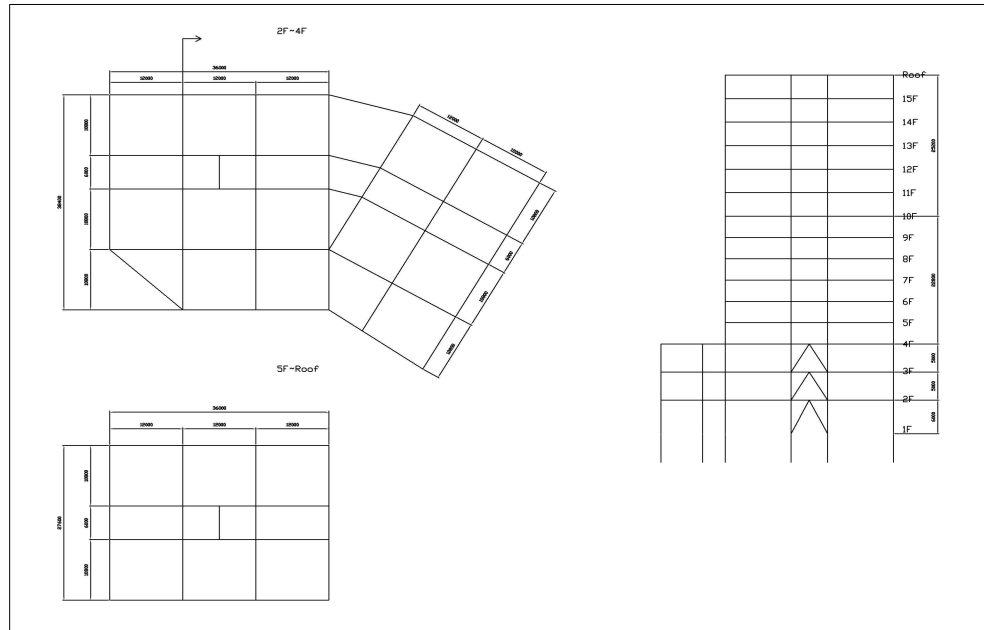
구 분	1안 교량받침 면진	2안 교량받침 면진, 말뚝두부면진장치
단 면 도		
PM상관도		
설계방법	소성설계 띠철근 및 보강철근(H25@75)	탄성설계 띠철근 및 보강철근(H16@300)

구 분	1안 교량받침면진	2안 교량받침 면진, 말뚝두부면진장치	3안 교량받침내진, 말뚝두부면진장치
철근공사비	축방향 철근 + 소성띠철근 148,898,000원	축방향 철근 + 소성 띠철근 129,679,000원	축방향 철근 + 소성 띠철근 148,898,000원
말뚝두부 면진장치	일반두부장치 20,880,000원	면진두부장치 108,000,000원	면진두부장치 108,000,000원
교량받침 변경	교량받침 : 면진받침 (2,800kN, LRB)	교량받침 : 면진받침 (2,800kN, LRB)	교량받침 : 내진받침 (2,800kN, 탄성받침) -200,000,000원
계	169,778,000원	237,679,000원	55,898,000원 (1안 대비 : -112,880,000원)
유지보수시	교량받침 교체시 4억원 예상	말뚝두부면진 전면 교체시 3.1억원 예상	말뚝두부면진 전면 교체시 3.1억원 예상

(가) 본 장치 사용으로 인한 공사비의 감소액은 교량받침 변경가능으로 1안 대비 절감액이 크게 발생

3. 건축물 한지거동 연구

가. 개요



지진 등의 동적하중에 의해 발생하는 구조물의 응답을 비교하기 위해 철근 골조 구조물 기초에 LRB 1000kN을 적용한 경우와 고정단의 경우에 대하여 각각을 비교 검토 하였다.

형 식	건축물
제 원	구조형식 : 철골조(도면참조)
재 료	콘크리트 $f_{ck} = 24MPa$ 강재 SM400(beam, Brace) SM490(Column)

나. 설계조건 및 작용하중

(1) 철골조 채원

- (가) Column : H700 × 300 × 13/24
- (나) Beam : H400 × 400 × 13/21
- (다) Brace : H200 × 200 × 8/12
- (라) Pile : P406.4 × 19

(2) 강재의 기계적 성질

	SM400	SM490
인장강도	400MPa	490MPa
항복강도	216MPa ~ 235MPa	294MPa ~ 314MPa

다. 자 중 : 프로그램 내 자동제하

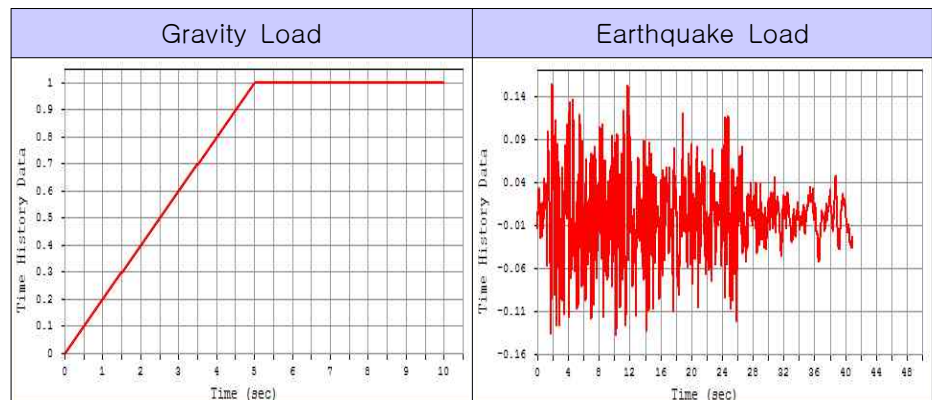
라. 작용 하중

- (1) 층간 작용하중은 두 해석 모델 모두 동일하게 재하하였다.

층	2F	3F	4F	5F	6F	7F	8F	9F	10F	11F	12F	13F	14F	15F	4F Roof	Roof
분할면적	4,739.321m ²		11,923.2m2												1,379.84m ²	993.6m ²
고정하중	3.7kN/m ²		4.3kN/m ²												5.2kN/m ²	
적재하중	4.0kN/m ²		2.5kN/m ²												2.0kN/m ²	
자 중	자동계산 (10,643.6kN)															
전체하중	142,573.989kN															

마. 지진하중

- (1) 해석 구조물은 내진성능 향상을 위해 건물과 기초사이에 LRB 1000kN을 사용하는 것으로 가정하였으며 지진하중은 LRB 1000kN이 충분히 항복하여 그 효과가 뚜렷이 나타날 수 있도록 El Centro(1542) 지진의 X, Y방향 성분을 그대로 사용하였다.
- (2) 구조물 해석시 사용한 비선형 해석은 선형 해석과는 달리 중첩의 원리가 적용될 수 없으므로 정적하중과 동적하중의 영향을 동시에 고려하기 위해 지진등의 동적하중이 작용하는 동안 정적하중이 지속적으로 재하되도록 하였다.



바. 구조해석 모델링 및 작용하중

(1) 기초고정 해석모델링

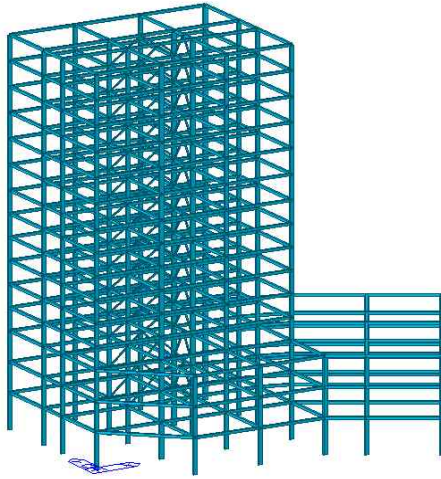


그림 38. 기초고정 해석 모델링

(2) LRB1000kN적용 해석모델링

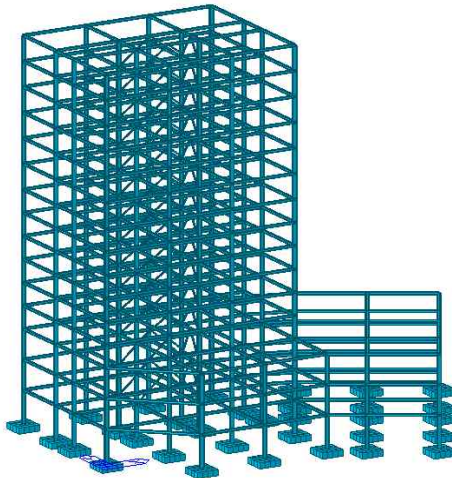


그림 39. LRB 적용 해석 모델링

사. 층간 작용하중 및 LRB 1000kN 적용

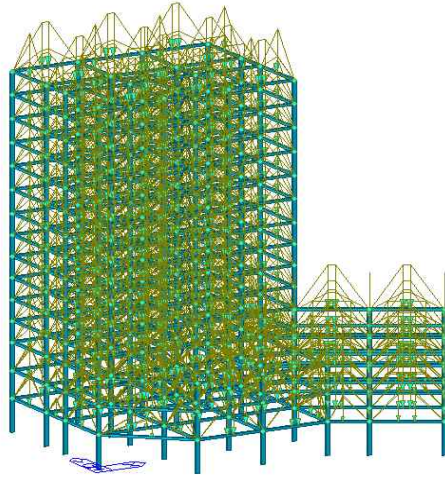


그림 40. 층간 작용하중

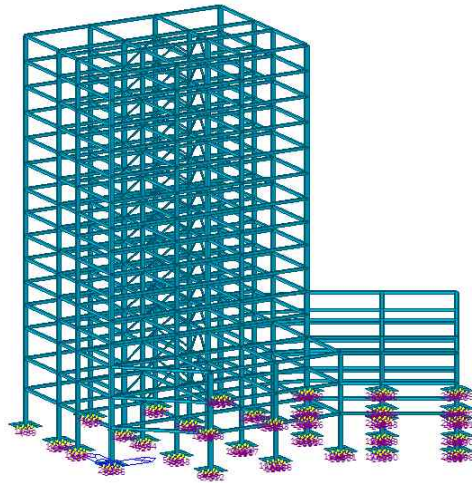
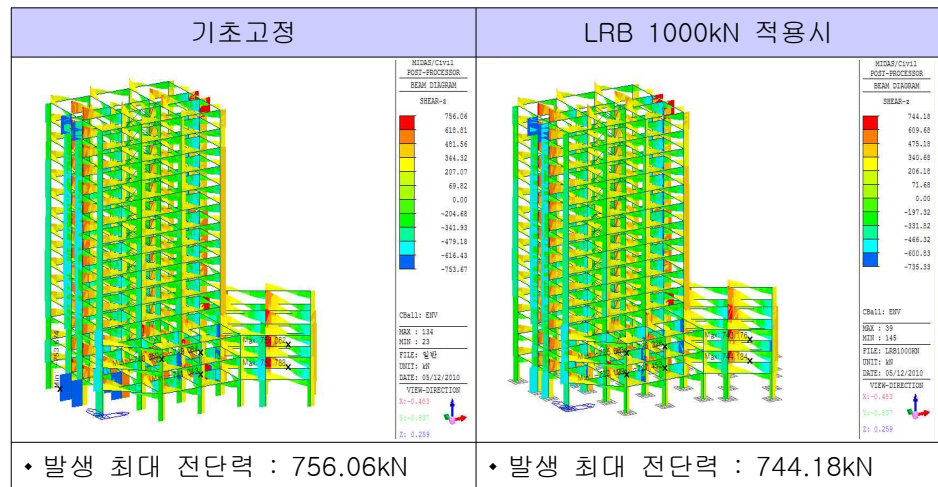


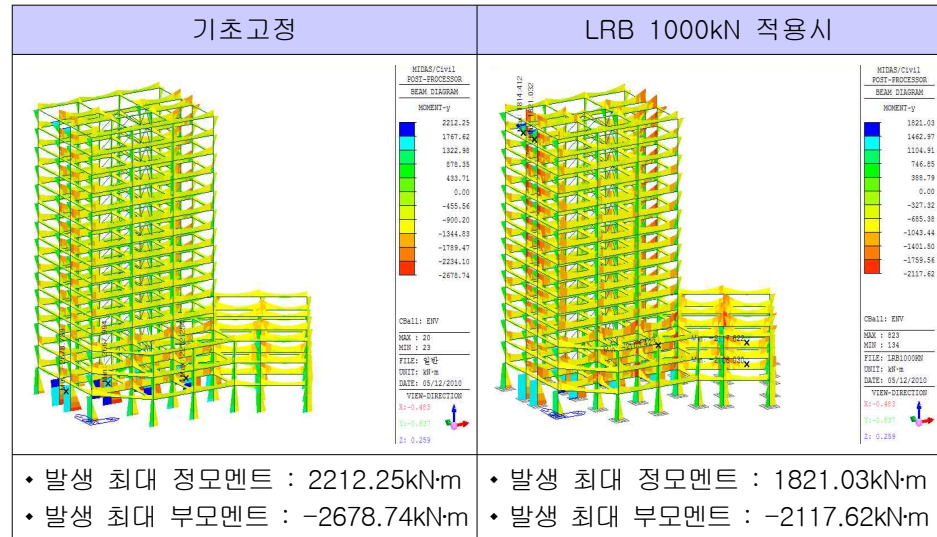
그림 41. LRB 적용(General Link)

아. 해석결과

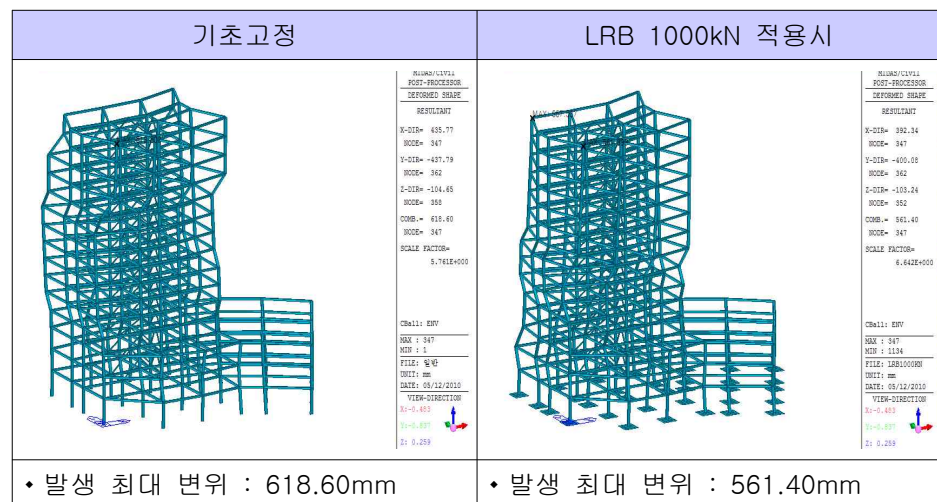
(1) 전단력도



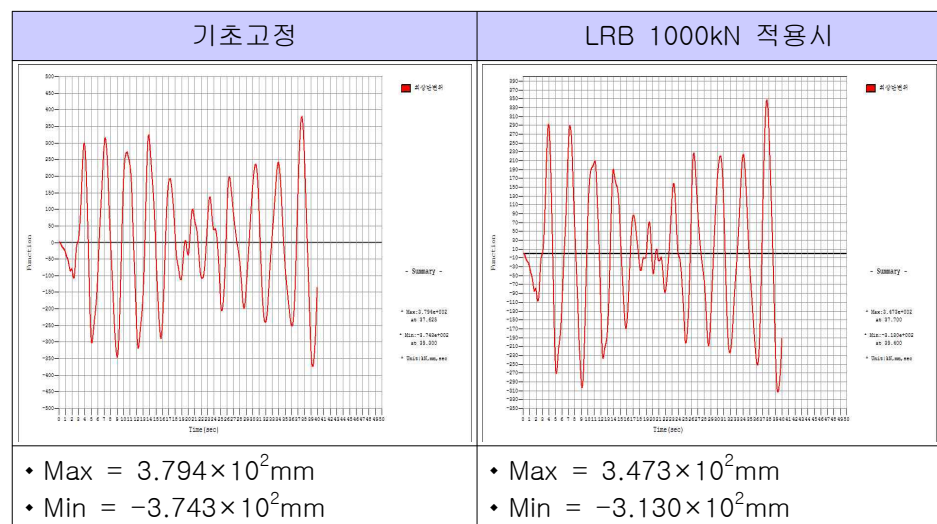
(2) 휨모멘트도



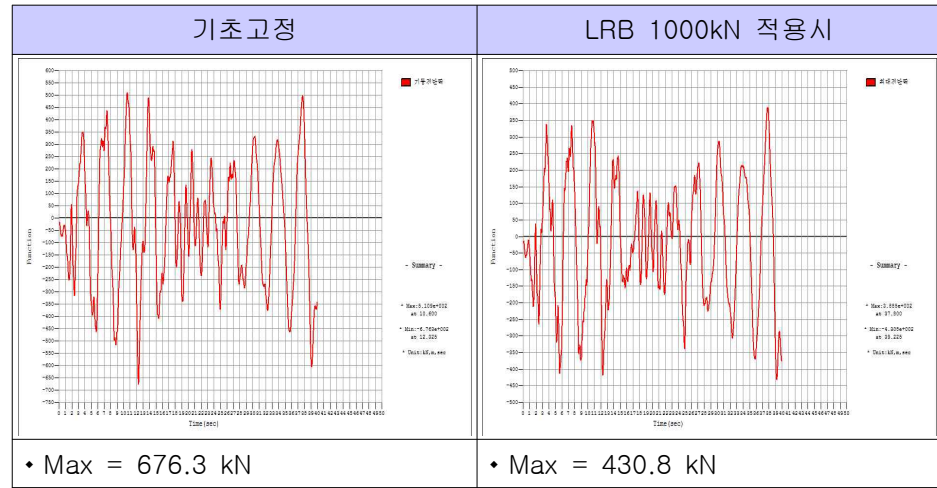
(3) 변위도



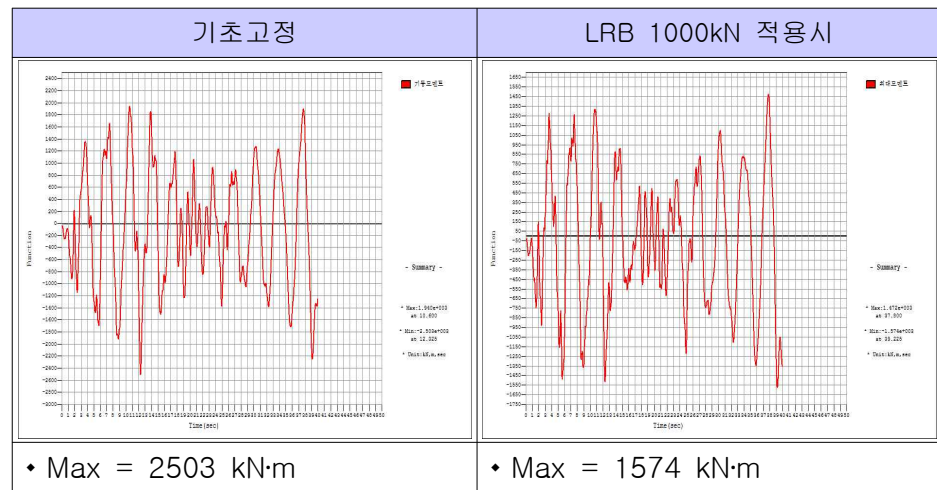
(4) 최상층 변위 시간이력(Global X 방향)



(5) 최하층 기둥 전단력(Global X 방향)



(6) 최하층 기둥 모멘트(Global X 방향)



(7) LRB 1000kN의 이력거동(Local z 방향)

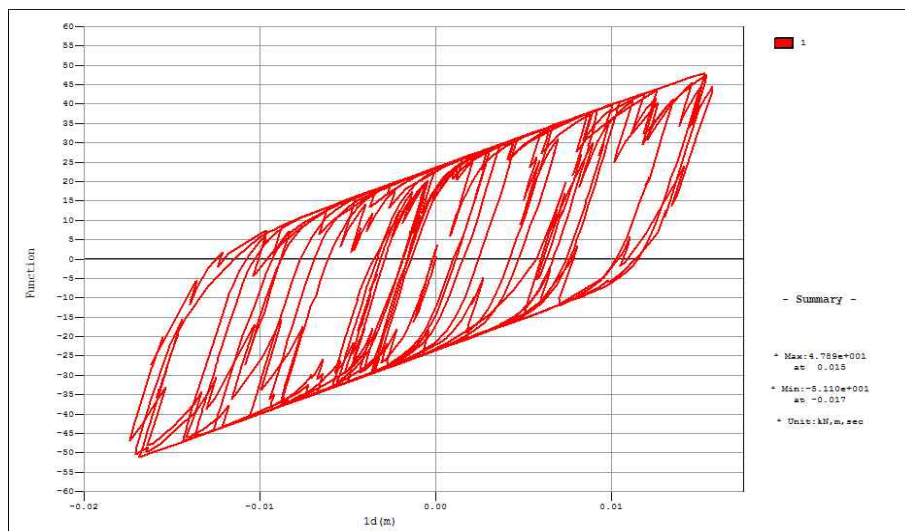
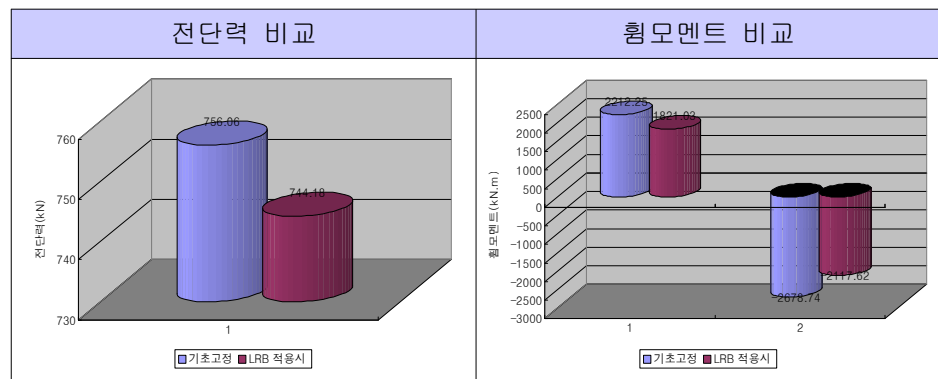


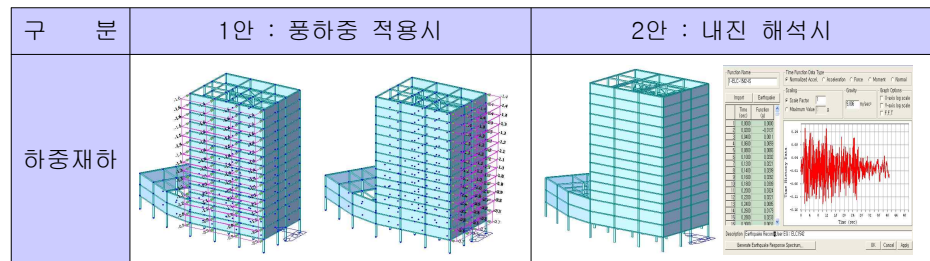
그림 42. LRB 1,000kN 이력거동(Local z Axis)

자. 결 론

- (1) LRB 1000kN을 적용하였을 경우와 적용하지 않았을 경우의 EI Centro(1542) 지진하중에 대하여 단면력과 변위 비교를 실시하였다.
- (2) 해석방법은 철골 건축 구조물을 모델링 후 자중 및 층간하중을 동일한 하중으로 재하한 후 LRB 1000kN의 물성치를 고려하여 기초하단에 설치하여 시간이력해석을 실시하였다.
- (3) 해석결과 LRB를 적용할 경우 전단력은 1.6%, 정모멘트는 17.7%, 부모멘트는 20.9%의 단면력 감소효과가 나타났다.



- (4) 경제성 분석 - 상시 하중조건인 풍하중 지배적인지 검토한 결과 지진 하중 지배적임을 알 수 있음



(가) 해석결과

구 분	축력 (kN)	모멘트 X방향 (kNm)	모멘트 Y방향 (kNm)
풍하중 적용시	12,582	716	518
내진 해석시	29,487	3,029	810

(나) 분 석

구 분	기초고정	말뚝두부 연진장치 적용시
단면제원	B×H=1,000mm×1,400mm As=H-900×300×16×28 Ab=2단철근(D29)	B×H=1,000mm×1,400mm As=H-700×300×13×24 Ab=2단철근(D29)
PM상관도	PM상관도 그래프 (기초고정)는 좌표축에 따라 다양한 강도 지수를 나타내며, 하단에는 단면도 및 주요 설계값이 기재되어 있다. 최소 편심 상태 $e_{min} = 125.692 \text{ mm}$ $\phi P_{min} = 29339.490 \text{ kN}$ $\phi M_{min} = 3653.876 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 편심 편심 상태 $e_{pb} = 1597.290 \text{ mm}$ $\phi P_b = 15867.870 \text{ kN}$ $\phi M_b = 7943.090 \text{ kN} \cdot \text{m}$ $e < e_{min} \therefore$ 최소편심구간 $\phi P_n = 29339.490 \text{ kN} (= \phi P_{min})$ $\phi M_n = 3653.876 \text{ kN} \cdot \text{m} (= \phi M_{min})$ 사용철근량 및 강재량 $A_{s, rebar} = 51392.000 \text{ mm}^2$ $A_{s, steel} = 36394.000 \text{ mm}^2$	PM상관도 그래프 (말뚝두부 연진장치 적용시)는 좌표축에 따라 다양한 강도 지수를 나타내며, 하단에는 단면도 및 주요 설계값이 기재되어 있다. 최소 편심 상태 $e_{min} = 119.792 \text{ mm}$ $\phi P_{min} = 28747.130 \text{ kN}$ $\phi M_{min} = 3443.395 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 편심 편심 상태 $e_{pb} = 433.458 \text{ mm}$ $\phi P_b = 16869.780 \text{ kN}$ $\phi M_b = 6965.562 \text{ kN} \cdot \text{m}$ $e < e_{min} \therefore$ 최소편심구간 $\phi P_n = 28747.130 \text{ kN} (= \phi P_{min})$ $\phi M_n = 3443.395 \text{ kN} \cdot \text{m} (= \phi M_{min})$ 사용철근량 및 강재량 $A_{s, rebar} = 55531.000 \text{ mm}^2$ $A_{s, steel} = 22976.000 \text{ mm}^2$

구 분	기존	말뚝두부 연진장치 적용시
철근공사비 증감	축방향 철근 + 띠철근	축방향 철근 + 띠철근
말뚝두부 연진장치 적용유무	-	연진 두부장치 : 448,000,000원 (베드 콘크리트 포함)
기동H형강 증감공사비	H-900×300×16×28	H-900×300×16×28
계	6,296,680,000원	5,540,600,000원 (-756,080,000원)
유지보수비	제진방법 등을 사용해야 하므로 유지보수비용 추정불가	말뚝두부연진 전면 교체시 : 6.3억원 예상 (유지관리실 설치 가능)

① 본 장치 사용으로 인한 공사비의 감소액은 크게 발생

4. 지중 박스 구조물 해석

가. 대상 구조물 개요

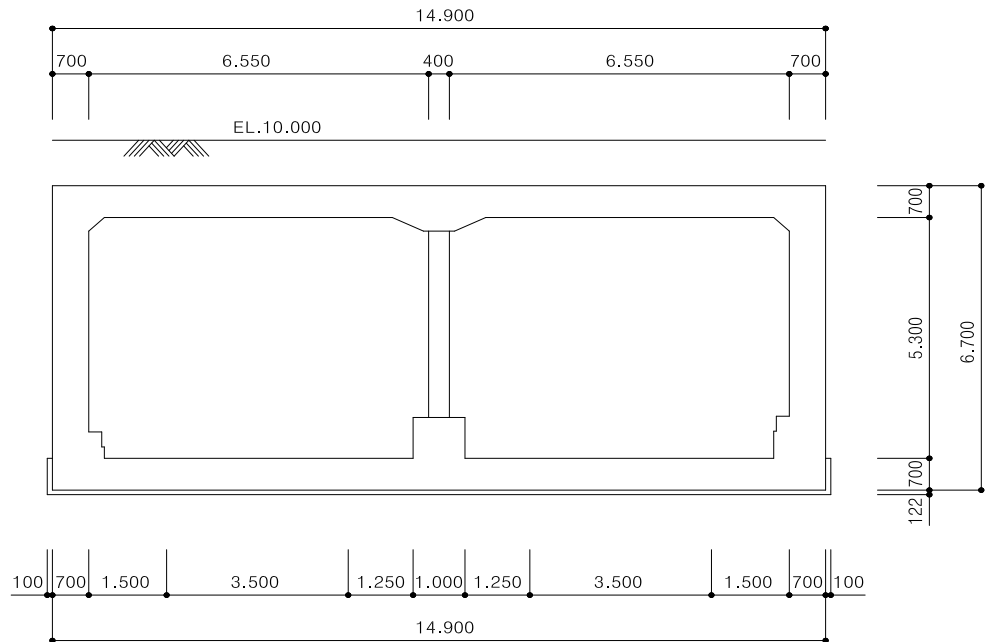


그림 43. 대상 구조물

해석에 사용된 구조물은 지하박스 구조물로 폭원은 14.9m, 높이는 6.7m의 지중 2런 박스로 구성하였다. 해석구조물은 LRB1000kN를 적용한 구조물과 적용하지 않은 구조물의 지진시의 단면력을 비교하여 LRB1000kN을 적용할 경우 단면력의 증가 또는 감소여부를 판단하였다. 구조물 상단의 토피는 1.0m로 가정하였고, 상재활하중 10kN/m² 및 지하수위를 고려하여 해석하였다. 해석에 사용된 구조물의 상세 제원은 다음과 같다.

구 분	제 원 (m)	비 고
폭 원	14.900	-
높 이	6.700	-
상부슬래브	0.700	-
하부슬래브	0.700	-
외측 벽체	0.700	-
내측 벽체	0.400	벽식 기둥

나. 설계조건

(1) 구조형식

(가) 지중2륜 박스(내공 : 6.25×5.3m)

(2) 재료중량

구 분	단 위 중 량 (kN/m³)
철근콘크리트	25.0
Mortar	21.5
포 장	22.5
지 하 수	10.0

(3) 토 사

(가) 흙의 내부마찰각 (ϕ)=30°

(나) 정지토압계수 (K_0)=1-sin ϕ =0.5

구 분	단 위 중 량 (kN/m³)
흙의 습윤 단위중량	19.0
흙의 수중 단위중량	10.0

(4) 지진계수

(가) 내진등급 : 1등급(위험도계수 : 기능수행수준 0.57, 붕괴방지수준 1.40)

(나) 지진구역 : I 구역(지진구역계수 : 0.11)

(다) 지반종류 : Sc(매우 조밀한 토사지반 또는 연암지반)

다. 지진해석 모델 및 단면제원

(1) 모델링

지중구조물의 경우 구조물의 겉보기 중량이 주변지반의 중량과 비교하여 가볍거나 혹은 같은 정도이고 지중구조물의 대부분이 주위가 지반으로 둘러 싸여 있음으로 인하여 발산감쇠(Radiation damping)가 커서 진동이 발생하여도 짧은 시간 안에 진정되는 특성을 갖고 있다.

이 때문에 지중구조물의 경우 관성력에 의한 응답의 증폭은 크지 않으며, 주변 지반의 움직임에 따라서 거동하게 된다. 따라서, 지중구조물에 발생하는 응력은 관성력에 의한 영향보다도 구조물 주변지반의 상대적인 변위에 의해 크게 영향을 받게 된다. 이와같은 사실에 근거하여, 지진시에 발생하는 지반의 변위를 구조물에 작용시켜서 지중구조물에 발생하는 응력을 정적으로 구하는 방법인 응답변위법을 적용한다.

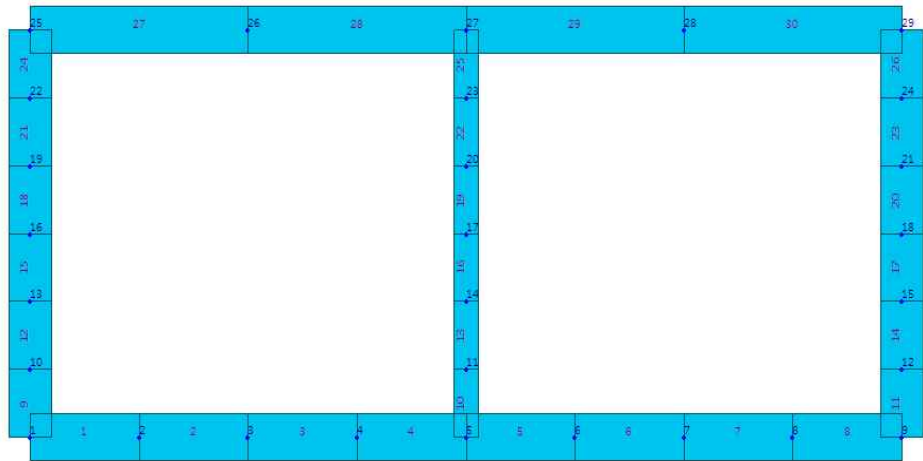
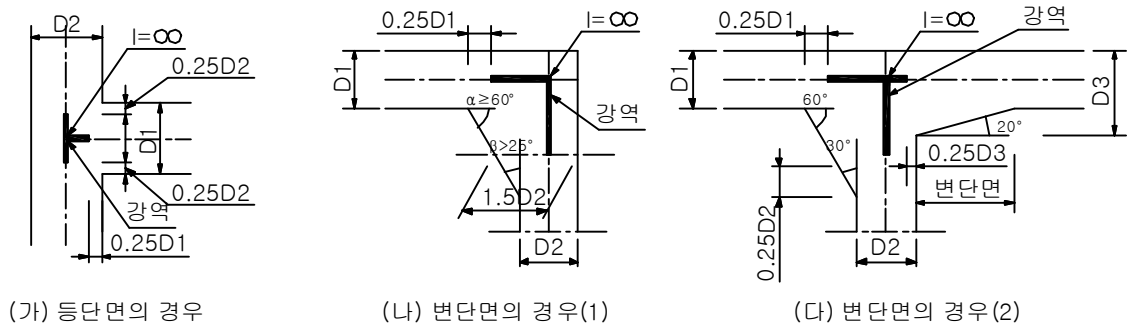


그림 44. 지중 구조물 구조해석 모델링

라. 단면제원

구 분	A (㎡)	I (m ⁴)	부 재
상부슬래브	0.7	0.02858	27~30
하부슬래브	0.7	0.02858	1~8
외측 벽체	0.7	0.02858	9,12,15,18,21,24,11,14,17,20,23,26
내측 벽체	0.4	0.00533	10,13,16,19,22,25

마. 강역산정



- (1) 외측벽체부 : $\frac{D_2}{2} - 0.25 \times D_1 = \frac{700}{2} - 0.25 \times 700 = 175mm$
- (2) 내측벽체부 : $\frac{D_2}{2} - 0.25 \times D_1 = \frac{700}{2} - 0.25 \times 900 = 100mm$

바. 하중산정

(1) 고정하중

(가) 구체자중 : PROGRAM 내에서 자동계산

(나) 상부고정하중 (지하수가 없을 경우)

① ASPHALT 포장하중: $0.500 \times 22.500 = 11.250 \text{ kN/m}^2$

② 토사 : $0.450 \times 19.000 = 8.550 \text{ kN/m}^2$

③ 방수 Mortar: $0.050 \times 21.500 = 1.075 \text{ kN/m}^2$

(다) 상부고정하중 (지하수가 있을 경우)

① ASPHALT 포장하중: $0.500 \times 22.500 = 11.250 \text{ kN/m}^2$

② 토사(지하수 이하) : $0.450 \times 10.000 = 4.500 \text{ kN/m}^2$

③ 방수 Mortar : $0.050 \times 21.500 = 1.075 \text{ kN/m}^2$

(2) 토 압(지하수가 없을 경우)

(가) $H_h = W_i + K_o \times (q_o + \gamma_t \times H_i)$

① EL.8.650 $0.500 \times (10.000 + 19.000 \times 1.000) = 14.500 \text{ kN/m}^2$

② EL.7.650 $14.500 + 0.500 \times 19.000 \times 1.000 = 24.000 \text{ kN/m}^2$

③ EL.6.650 $24.000 + 0.500 \times 19.000 \times 1.000 = 33.500 \text{ kN/m}^2$

④ EL.5.650 $33.500 + 0.500 \times 19.000 \times 1.000 = 43.000 \text{ kN/m}^2$

⑤ EL.4.650 $43.000 + 0.500 \times 19.000 \times 1.000 = 52.500 \text{ kN/m}^2$

⑥ EL.3.650 $52.500 + 0.500 \times 19.000 \times 1.000 = 62.000 \text{ kN/m}^2$

⑦ EL.2.650 $24.000 + 0.500 \times 19.000 \times 5.000 = 71.500 \text{ kN/m}^2$

(3) 토압(지하수가 있을 경우)

(가) $H_h = W_i + K_o \times (q_o + \gamma_w \times H_i)$

① EL.8.650 $0.500 \times (10.000 + 10.000 \times 1.000) = 10.000 \text{ kN/m}^2$

② EL.7.650 $10.000 + 0.500 \times 10.000 \times 1.000 = 15.000 \text{ kN/m}^2$

③ EL.6.650 $15.000 + 0.500 \times 10.000 \times 1.000 = 20.000 \text{ kN/m}^2$

④ EL.5.650 $20.000 + 0.500 \times 10.000 \times 1.000 = 25.000 \text{ kN/m}^2$

⑤ EL.4.650 $25.000 + 0.500 \times 10.000 \times 1.000 = 30.000 \text{ kN/m}^2$

⑥ EL.3.650 $30.000 + 0.500 \times 10.000 \times 1.000 = 35.000 \text{ kN/m}^2$

⑦ EL.2.650 $15.000 + 0.500 \times 10.000 \times 5.000 = 40.000 \text{ kN/m}^2$

(4) 지하수압(지하수위 GL=-1.0m)

(가) 연직수압 : $H_h = \gamma_w \times H_i$

① 상부슬래브 : $10.000 \times 0.000 = 0.000 \text{ kN/m}^2$

② 하부슬래브 : $10.000 \times (0.000 + 6.700) = 67.000 \text{ kN/m}^2$

(나) 수평수압 : $H_h = W_i + \gamma_w \times H_i$

① EL.8.650 $0.000 + 10.000 \times 0.000 = 0.000 \text{ kN/m}^2$

② EL.7.650 $0.000 + 10.000 \times 1.000 = 10.000 \text{ kN/m}^2$

③ EL.6.650 $10.000 + 10.000 \times 1.000 = 20.000 \text{ kN/m}^2$

④ EL.5.650 $20.000 + 10.000 \times 1.000 = 30.000 \text{ kN/m}^2$

⑤ EL.4.650 $30.000 + 10.000 \times 1.000 = 40.000 \text{ kN/m}^2$

⑥ EL.3.650 $40.000 + 10.000 \times 1.000 = 50.000 \text{ kN/m}^2$

⑦ EL.2.650 $10.000 + 10.000 \times 5.000 = 60.000 \text{ kN/m}^2$

(5) 지반반력계수(지진시)

(가) V_o (초기상태 전단파 속도) : $V_o = 80 \times N^{1/3}$

(나) V_s (전단파 속도) : $V_s = 1.0 \times V_o$

(다) G_d (전단탄성계수) : $G_d = \gamma/g \times V_s^2$

(라) E_d (탄성계수) : $E_d = 2 \times (1+\nu) \times G_d$

① 기능수행수준

구 분	N	γ_s	ν	V_o	V_s	G_d	E_d	K_{vo}	K_v, K_h	K_{sb}, K_{ss}
상 부	30	20	0.30	249	249	125976	327538	218359	20974	6991
하 부	30	20	0.30	249	249	125976	327538	218359	20974	6991
측 벽	30	20	0.30	249	249	125976	327538	218359	21113	7038

② 붕괴방지수준

구 분	N	γ_s	ν	V_o	V_s	G_d	E_d	K_{vo}	K_v, K_h	K_{sb}, K_{ss}
상 부	30	20	0.30	249	199	80625	209624	139750	13423	4474
하 부	30	20	0.30	249	199	80625	209624	139750	13423	4474
측 벽	30	20	0.30	249	199	80625	209624	139750	13512	4504

(6) 고유주기

기능수행수준	붕괴방지수준
$T_{G'} = \sum_{i=1}^N \frac{4H_i}{V_{si}} = 0.124\text{sec}$	$T_{G'} = \sum_{i=1}^N \frac{4H_i}{V_{si}} = 0.155\text{sec}$
$T_G = 1.25 T_{G'} = 0.155\text{sec}$	$T_G = 1.25 T_{G'} = 0.194\text{sec}$

(7) 통제주기

기능수행수준	붕괴방지수준
$T_s = \frac{C_v}{(2.5 \times C_a)} = 0.554\text{sec}$	$T_s = \frac{C_v}{(2.5 \times C_a)} = 0.554\text{sec}$
$T_o = 0.2 \times T_s = 0.111\text{sec}$	$T_o = 0.2 \times T_s = 0.111\text{sec}$

(8) 감쇠율에 대한 보정계수

기능수행수준	붕괴방지수준
$C_d = \frac{1.5}{40h+1} + 0.5 = 0.800$	$C_d = \frac{1.5}{40h+1} + 0.5 = 0.667$

(9) 가속도 응답스펙트럼(기능수행수준:재현주기 100년 적용)

$T_o \leq T_G < T_s$ 이므로 $S_a = 2.5 \times C_a \times g \times I \times C_d$

기능수행수준	붕괴방지수준
1.454m/sec ²	2.976m/sec ²

(10) 상부슬래브 지반변위 하중

$$P_o = K_{sb, \top} \times (U_{zu} - U_{zb})$$

기능수행수준	붕괴방지수준
0.559kN/m²	1.145kN/m²

(11) 측벽 지반변위 하중

$$P_z = K_h \times (U_{hu} - U_{hb})$$

(가) 기능수행수준

z(m)	Kh (kN/m³)	U(Zh) (m)	U(Zh)-U(Zb) (m)	P(z) (kN/m²)
1.350	21113.074	0.001122	0.000079	1.678
2.350	21113.074	0.001116	0.000074	1.557
3.350	21113.074	0.001108	0.000065	1.373
4.350	21113.074	0.001096	0.000053	1.124
5.350	21113.074	0.001081	0.000038	0.811
6.350	21113.074	0.001063	0.000021	0.436
7.350	21113.074	0.001042	0.000000	0.000

(나) 붕괴방지수준

z(m)	Kh (kN/m³)	U(Zh) (m)	U(Zh)-U(Zb) (m)	P(z) (kN/m²)
1.350	13512.367	0.003588	0.002546	34.397
2.350	13512.367	0.003570	0.002527	34.151
3.350	13512.367	0.003542	0.002499	33.773
4.350	13512.367	0.003504	0.002462	33.264
5.350	13512.367	0.003457	0.002414	32.624
6.350	13512.367	0.003400	0.002358	31.857
7.350	13512.367	0.003334	0.002292	30.964

(12) 주면전단력

(가) 상부슬래브 : $V_u = G_d \times f'(Uh1)$

(나) 하부 슬래브 : $V_b = G_d \times f'(Uh2)$

(다) 측벽 : $V_s = (V_u - V_b) / 2$

구 분	기능수행수준	붕괴방지수준
상부슬래브	0.524kN/m²	1.072kN/m²
하부슬래브	2.785kN/m²	5.701kN/m²
외측벽체	1.655kN/m²	3.387kN/m²

(13) 구체관성력

$$(가) f_i = (A_i \times \gamma_{con'c} \times K_H \times (1 - 0.015 \times Z_i))$$

(나) 상하부 슬래브

구 분	기능수행수준	붕괴방지수준
상부슬래브	1.270kN/m ²	3.121kN/m ²
하부슬래브	1.154kN/m ²	2.834kN/m ²

(다) 외측벽체

Zi(m)	구 분	기능수행수준(kN/m ²)	붕괴방지수준(kN/m ²)
1.350	외측벽체	1.270	3.121
2.350	외측벽체	1.251	3.073
3.350	외측벽체	1.232	3.025
4.350	외측벽체	1.212	2.977
5.350	외측벽체	1.193	2.929
6.350	외측벽체	1.173	2.882
7.350	외측벽체	1.154	2.834

(라) 내측벽체

Zi(m)	구 분	기능수행수준(kN/m ²)	붕괴방지수준(kN/m ²)
1.350	외측벽체	0.726	1.783
2.350	외측벽체	0.715	1.756
3.350	외측벽체	0.704	1.729
4.350	외측벽체	0.693	1.701
5.350	외측벽체	0.682	1.674
6.350	외측벽체	0.670	1.647
7.350	외측벽체	0.659	1.619

사. 하중계수 및 하중조합

(1) αH : 토피의 두께에 따른 연직방향 하중Hv에 대한 보정계수

(2) h ≤ 2.0 m 에 대해서, αH = 1.0

(가) 기능수행수준

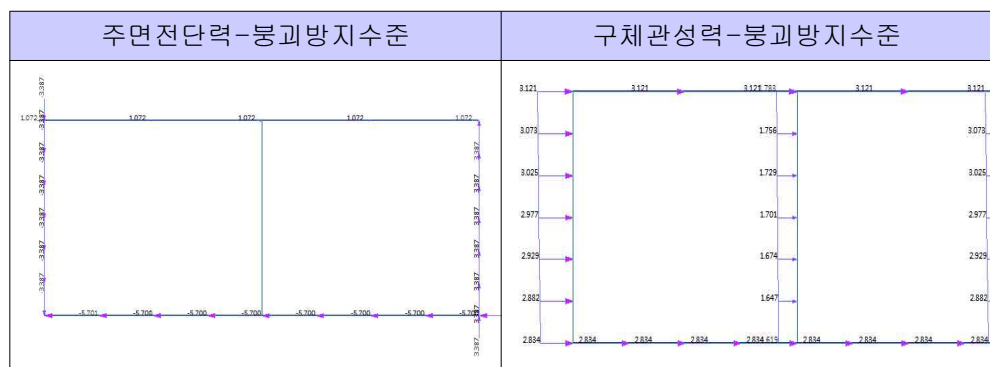
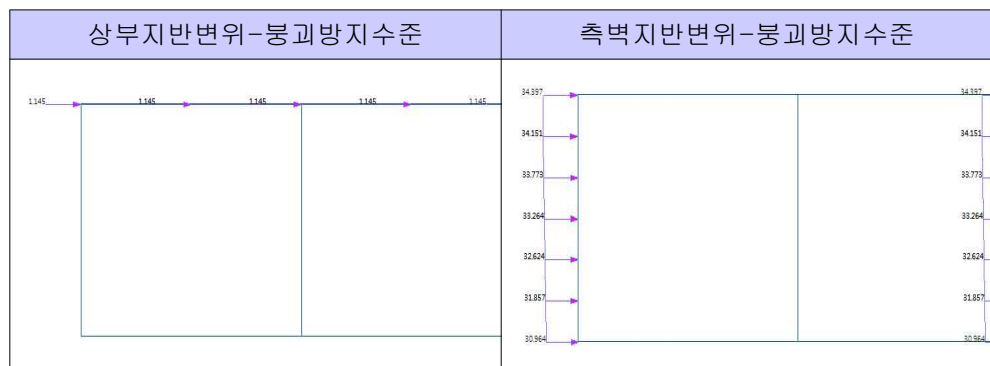
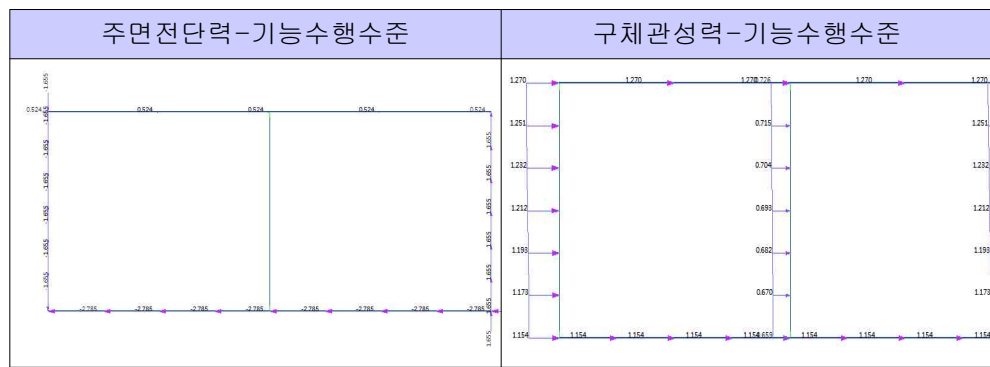
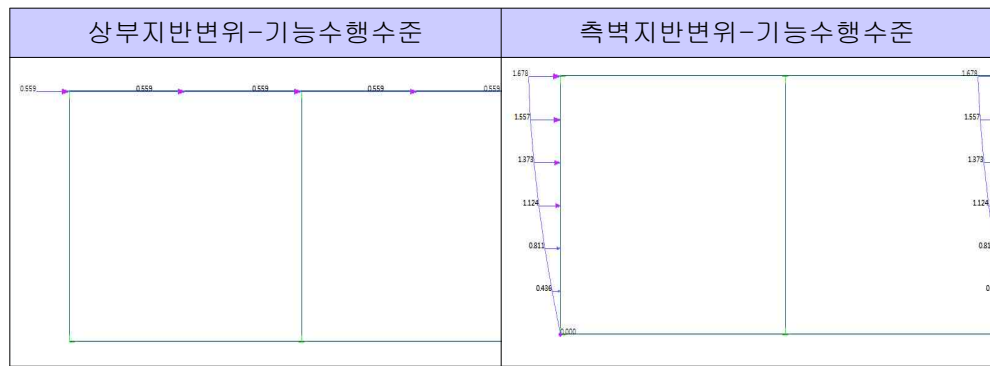
구 분	고정하중			토압	연직수압	수평수압	지진하중
	구체자중	지하수 無	지하수 有				
COM1	1.200						1.400
COM2	0.900	0.900		1.600			1.400
COM3	0.900		0.900	1.600	1.600	1.600	1.400
COM4	0.900						1.400

(나) 붕괴방지수준

구분	고정하중			토압	연직수압	수평수압	지진하중
	구체자중	지하수 無	지하수 有				
COM1	1.200						1.000
COM2	0.900	0.900		1.600			1.000
COM3	0.900		0.900	1.600	1.600	1.600	1.000
COM4	0.900						1.000

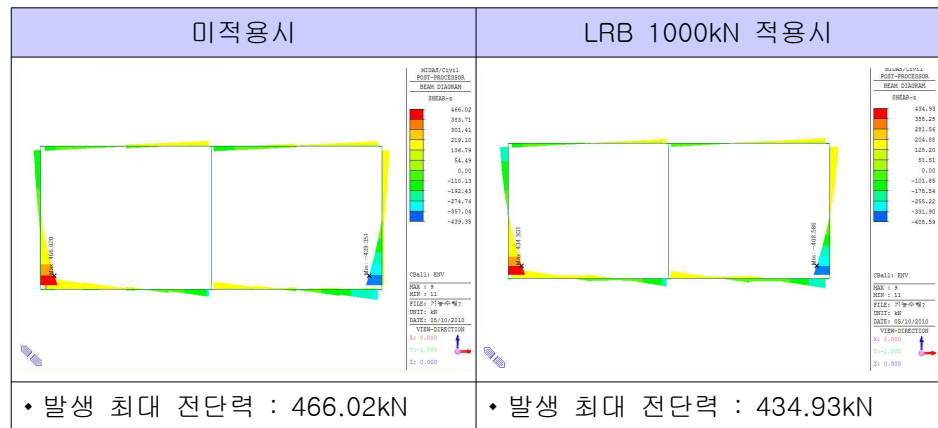
아. 하중재하도



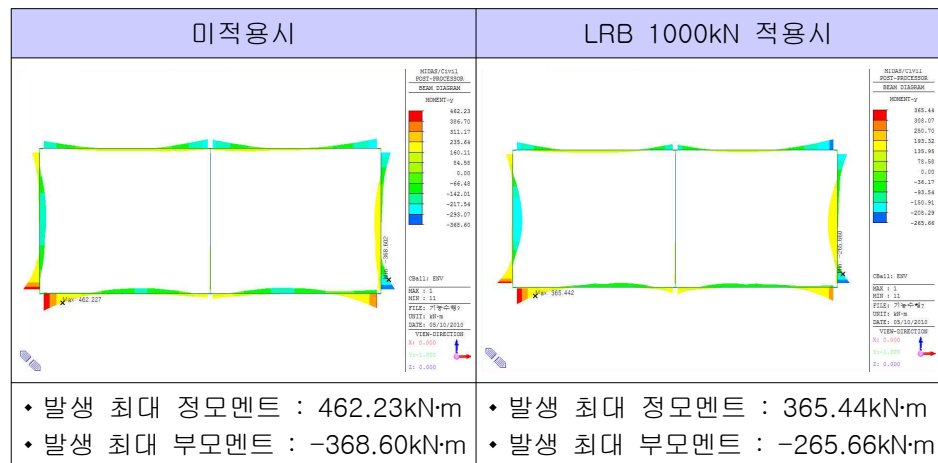


자. 기능수행수준 해석결과

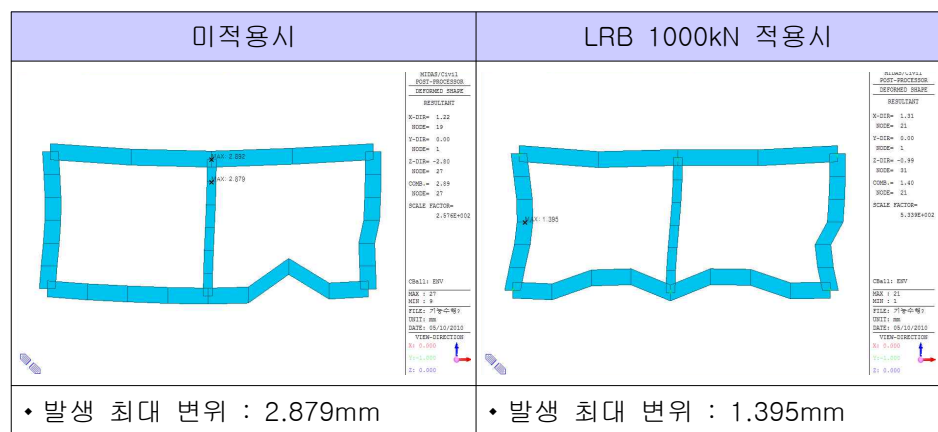
(1) 전단력도



(2) 휨모멘트도

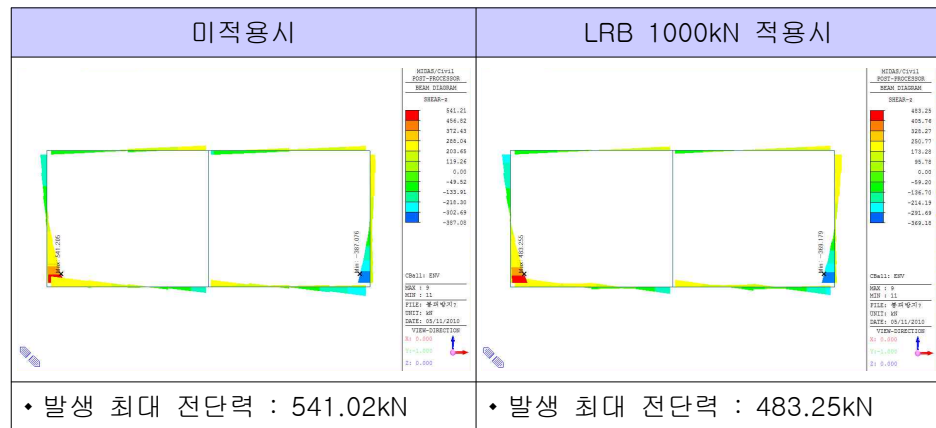


(3) 변위도

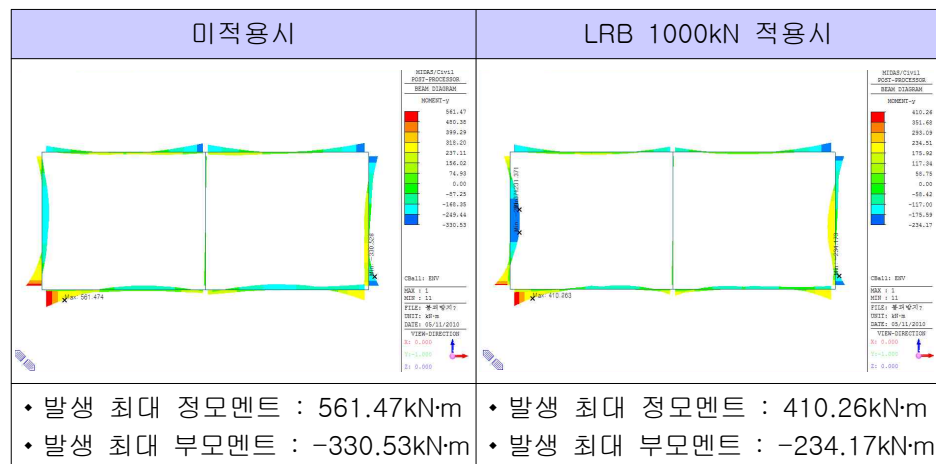


차. 붕괴방지수준 해석결과

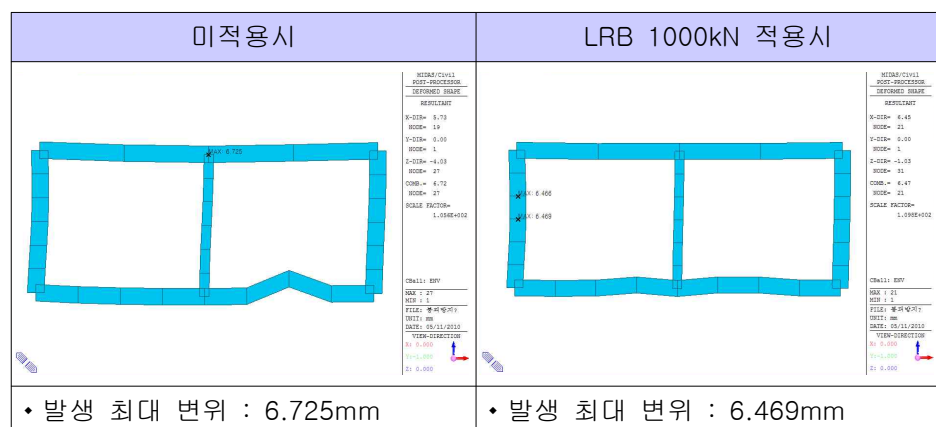
(1) 전단력도



(2) 휨모멘트도

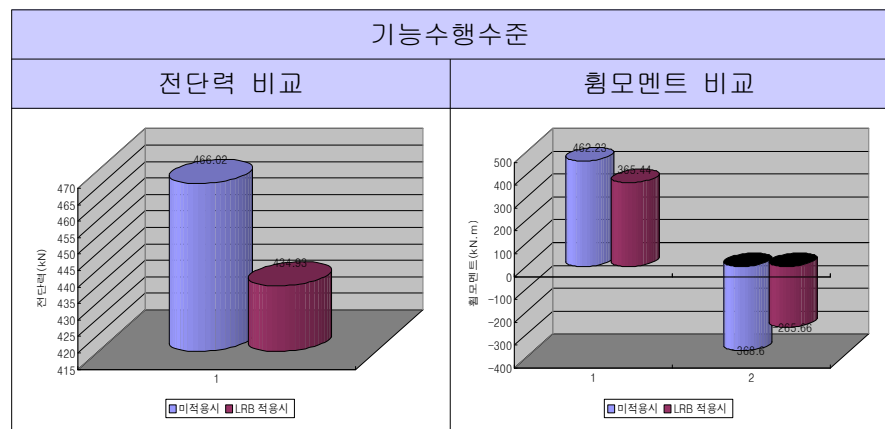


(3) 변위도

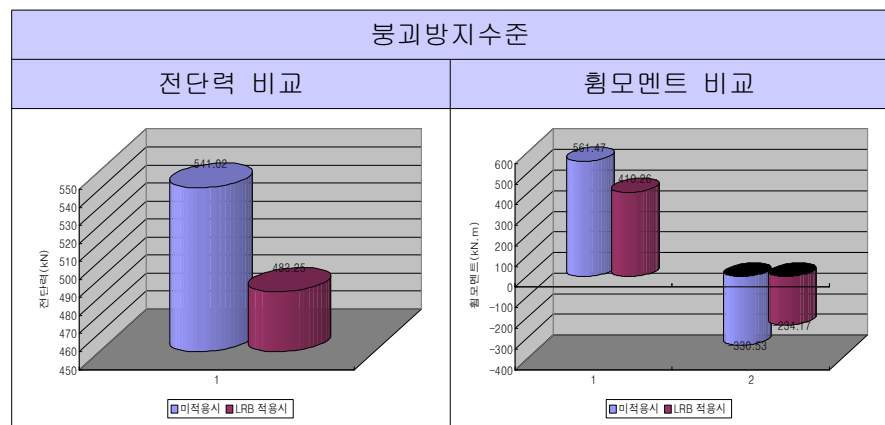


카. 결 론

- (1) LRB 1000kN을 적용하였을 경우와 적용하지 않았을 경우의 지진시 기능수행수준 및 붕괴방지수준에 대하여 단면력과 변위 비교를 실시하였다.
- (2) 해석방법은 지중2륜 박스구조물을 모델링 후 자중 및 토압 외에 지반 변위, 주면전단력, 구체관성력을 동일한 하중으로 재하한 후 LRB 1000kN의 물성치를 고려하여 하부슬래브의 측벽부 및 중앙부에 재하였다.
- (3) 기능수행수준
 - (가) 기능수행수준에 대한 해석결과 LRB를 적용할 경우 전단력은 6.7%, 정모멘트는 20.9%, 부모멘트는 27.9%의 단면력 감소효과가 나타났다.

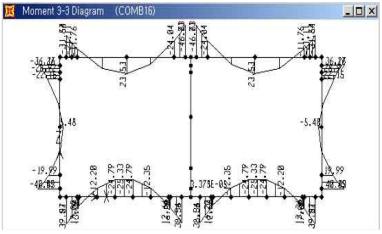
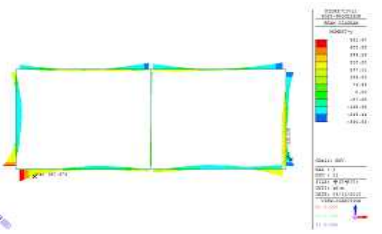


- (4) 붕괴방지수준
 - (가) 기능수행수준에 대한 해석결과 LRB를 적용할 경우 전단력은 10.7%, 정모멘트는 26.9%, 부모멘트는 29.2%의 단면력 감소효과가 나타났다.



(5) 경제성 분석

상시해석 지배적인지 지진하중 지배적인지 검토한 결과 상시지배적인 구조물이므로 경제성분석 생략

구 분	상시해석(Tonf)	내진해석(기초고정)
단면력		
	발생 최대 정모멘트 293.3kNm (29.33 tonf.m) 발생 최대 부모멘트 -408.9kNm(40.89 tonf.m)	발생 최대 정모멘트 : 462.23kNm 발생 최대 부모멘트 : -368.60kNm

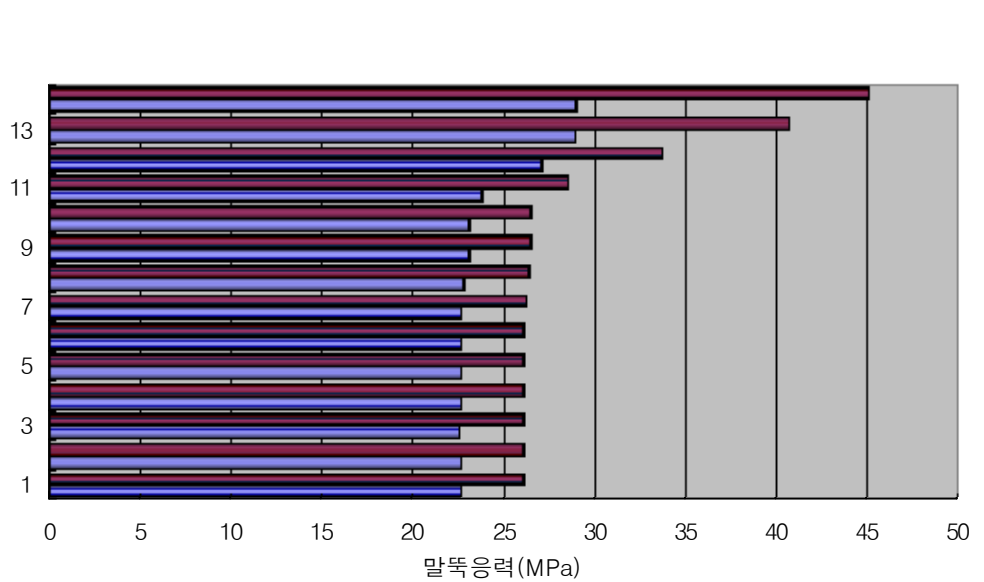
(가) 지진시 벽체에 작용하는 모멘트가 상시 해석시 토압으로 인한 단면력보다 크게 발생하므로 벽체 공사비에 대해 절감요인이 발생하나, 슬래브에 부모멘트가 감소되므로 상시 지배적임 따라서, 경제성 검토가 불필요

5. 말뚝 두부 경계조건 변화시 검토

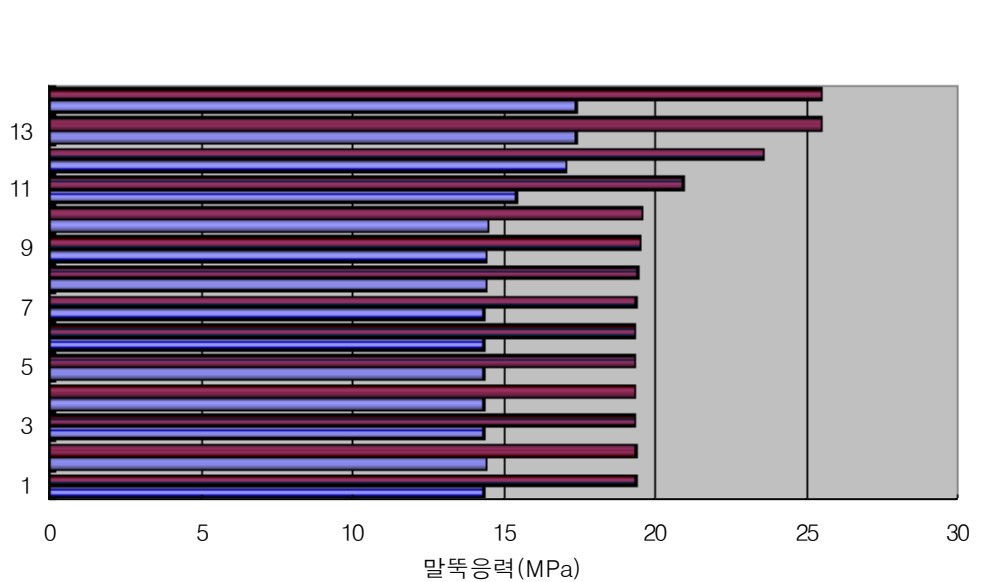
가. 해석 결과

- (1) 해석교량 대상의 암기교의 말뚝 두부 경계조건 변화에 따른 말뚝 본체의 응력변화임
- (2) 말뚝두부 고정 경계조건하에서 응답값이 크게 발생하므로 말뚝 본체 응력도 크게 발생하였고, 말뚝면진(LRB)사용시 힌지조건으로 변화한 경우에는 응답 값이 작아 말뚝 본체 응력이 감소한 것으로 나타났다.

말뚝두부 고정시



LRB 적용시



제3절 전단 스프링 연구

1. 전단스프링(탄성고무) 수치해석 연구

지진격리받침의 특성과약을 위하여 상기의 절에서 설명한 바와 같이 다양한 실험항목에 대하여 장시간에 걸쳐 실험을 수행하였다. 고온과 저온실험을 제외한 실험온도는 +23℃이며 각 실험항목에 대한 실험방법 및 결과는 다음과 같다.

시험체 종류	설계용량
납면진받침(LRB)	수직하중 : 1,000kN
고강쇠 고무받침(HDRB)	수평변위 : 50mm
천연 고무받침(NRB)	시험체수 : 총 16EA
면진형 디스크 받침(EDS)	(지진격리장치별 4EA)

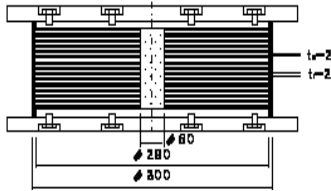


그림 45. LRB

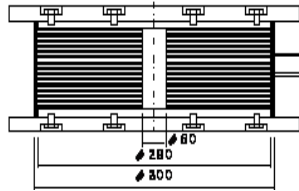


그림 46. HDRB, NRB

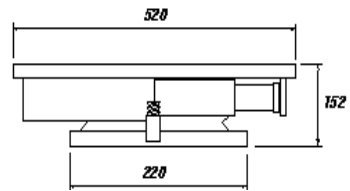
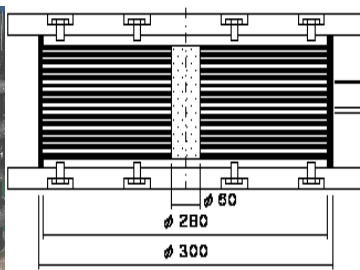


그림 47. EDS

시험장비	구 분		용 량
	하 중	수 직	2,000kN
		수 평	500kN, 1,500kN
	주파수	수 직	10Hz
		수 평	15Hz



Type-1 : Laminated Rubber Bearing



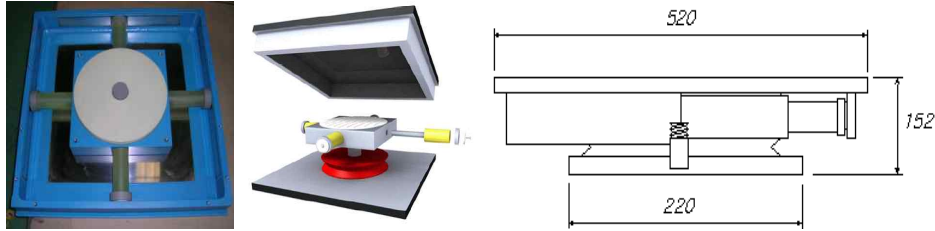
$$S_1 = \left(\frac{D_s - D_k}{4t_i} \right) : 1차 형상계수$$

$$S_2 = \left(\frac{D_s}{nt_i} \right) : 2차 형상계수$$

D_s : 내부보강철판의 직경
 D_k : 내부 홀의 직경
 t_i : 고무 한 층의 두께
 n : 고무 층 수

시험체	항목	강판지름 (mm)	내부지름 (mm)	전체지름 (mm)	고무두께 (mm)	고무층수 (mm)	강판두께 (mm)	형상계수		시험체 개수(EA)
								S1	S2	
납면진받침(LRB)		280	60	300	2	25	2	27.5	7	4
고강쇠 고무받침(HDRB)		280	60	300	2	25	2	27.5	7	4
천연고무받침(NRB)		280	60	300	2	25	2	27.5	7	4

Type-2 : Polyurethane Disk Sliding Bearing



가. 적층형 고무받침

지진격리받침의 압축응력에 대한 의존성을 파악하기 위하여 다양한 면압에 대하여 압축-전단실험을 수행하였다. 압축응력에 따른 등가전단강성과 등가감쇠비의 의존성을 파악하기 위해 다양한 압축응력에 대하여 압축-전단실험을 수행하였다. 실험은 상온상태에서 해당 설계면압이 유지되도록 일정하게 수직하중을 재하하고, 설계전단변위($\gamma = 100\%$)가 발생하도록 0.5Hz의 정현파를 11회 반복재하 하였다. 실험은 설계면압의 0%, 50%, 100%, 150%, 200% 등에 해당하는 총 5가지 면압에서 수행하였다. 실험에 따른 등가전단강성(K_h)과 등가감쇠비(h_{eq})의 변화율은 그림 3.8 및 그림 3.9와 같다. 등가전단강성은 LRB의 경우 약 $\pm 5\%$, HDRB의 경우 $\pm 7\%$ 변화되는 반면에 NRB는 압축응력이 증가함에 따라서 $\pm 20\%$ 가량 변화하여 LRB와 HDRB에 비하여 면압의존성이 비교적 큰 것으로 나타났다. 등가감쇠비는 면압이 증가함에 따라 등가전단강성과 달리 증가하는 경향이 있었다. 등가감쇠비는 LRB가 평균적으로 33.9%로 가장 높은 감쇠비를 나타냈고, HDRB가 21% 그리고 NRB가 3%의 감쇠비를 발현하였다.

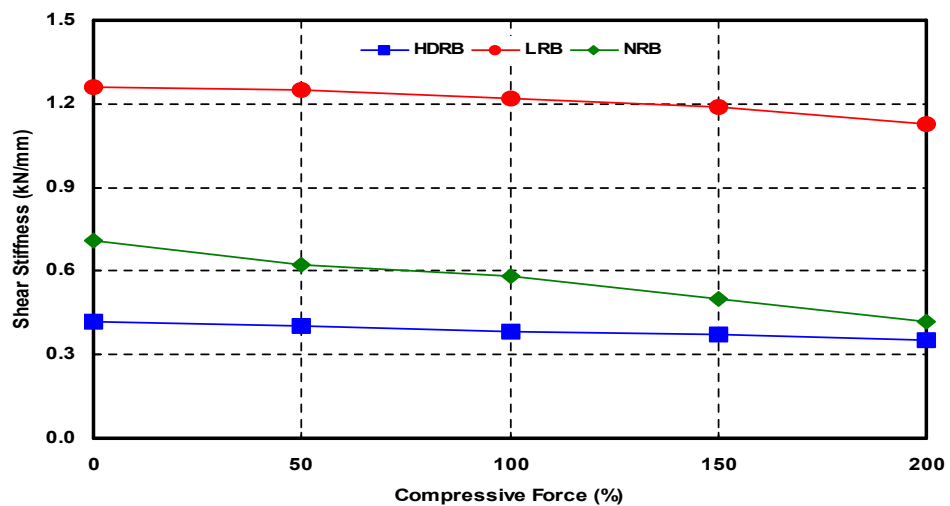


그림 48. 압축하중의 변화에 따른 전단강성의 변화

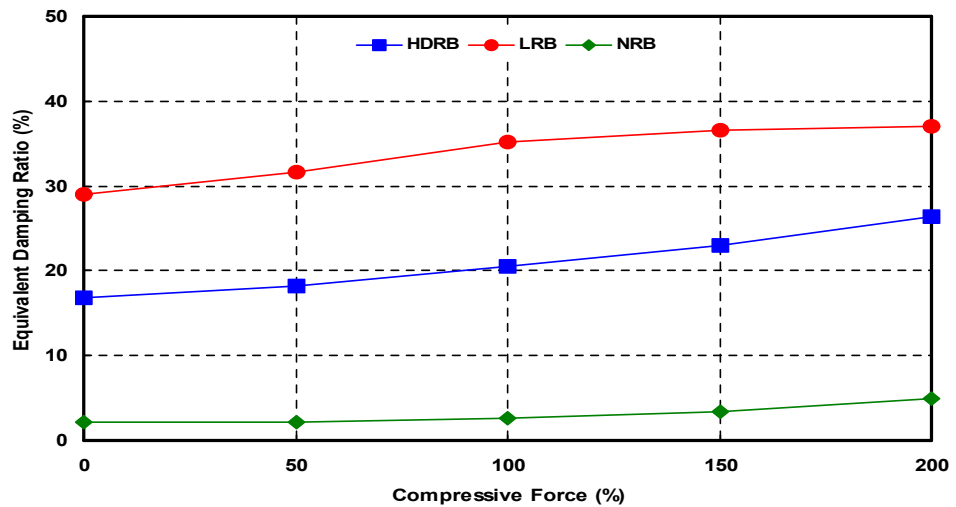


그림 49. 압축하중의 변화에 따른 등가감쇠비의 변화

나. 전단변형률 의존성 실험

적층형 고무받침의 전단변형률에 따른 등가전단강성과 등가감쇠비의 변화를 파악하기 위하여 다양한 전단변위에 대하여 압축-전단실험을 수행하였다. 실험은 상온상태에서 설계면압이 유지되도록 수직하중을 일정하게 재하한 상태에서, 해당 전단변위가 발생하도록 0.5Hz의 정현파를 11회 반복재하 하였다. 전단변형률은 50%, 75%, 100%, 125%, 150%, 175%, 200%로 전단변형이 작은 시험부터 큰 시험 순서로 실험을 실시하였다. 그리고 반복횟수는 전단시험과 동일하다. 전단변형률 100%에서의 시험값을 기준으로 등가전단강성과 등가감쇠비의 변화율을 산정하여 그림 3.11과 그림 3.12에 나타내었다. 전단변형률 50~200%의 범위에서 등가전단강성과 등가감쇠비는 모두 전단변형율이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내었다. 이중에서 납 면진받침(LRB)이 가장 큰 변화를 보였고, 평균 등가감쇠비가 32% 가량으로 가장 높게 나타났다.

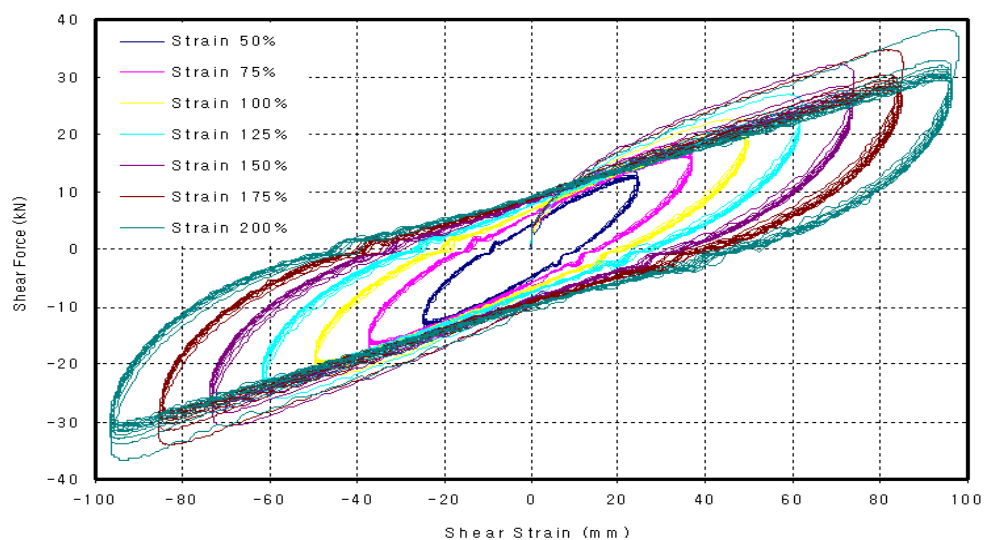


그림 50. 전단변형률 실험결과(HDRB)

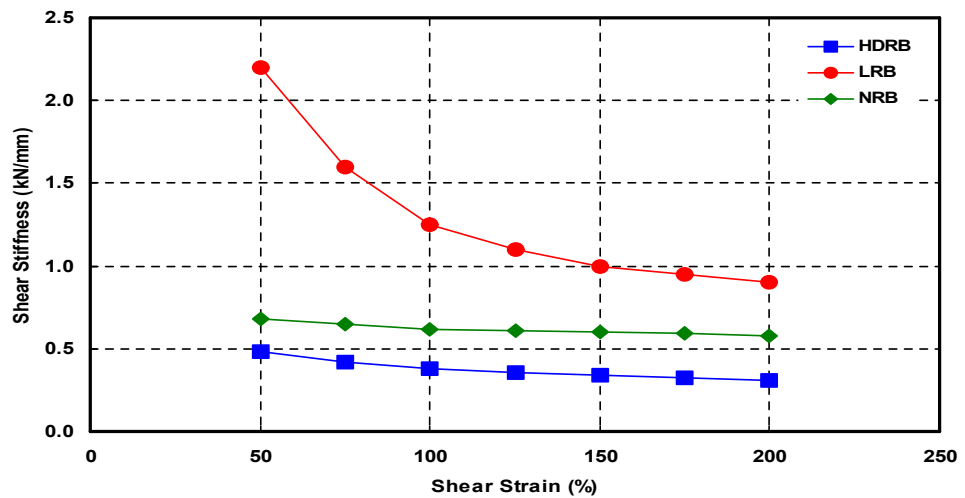


그림 51. 전단변형률에 따른 등가전단강성의 변화

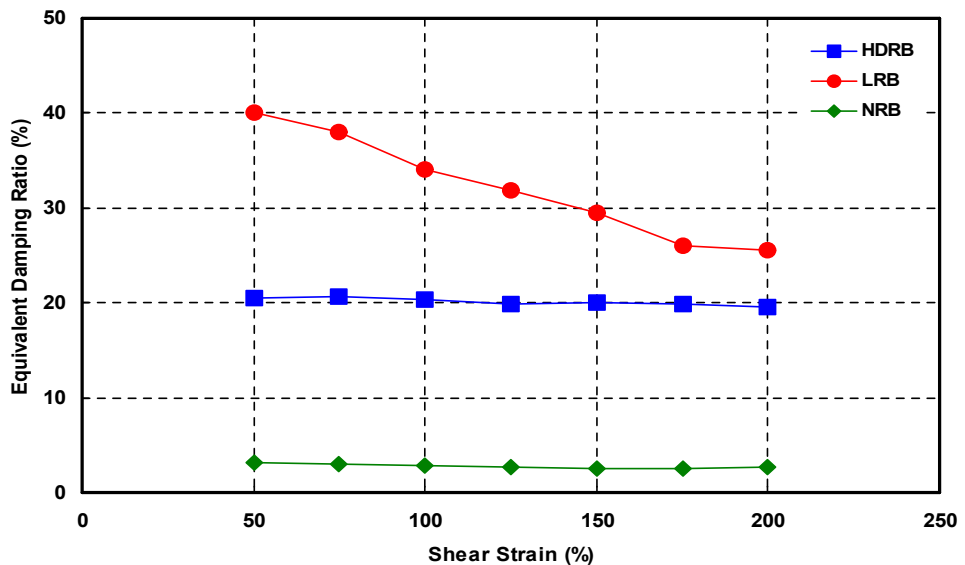


그림 52. 전단변형률에 따른 등가감쇠비의 변화

다. 주파수 의존성 실험

주파수 변화에 따른 등가전단강성과 등가감쇠비의 변화를 파악하기 위하여 다양한 주파수에 대해 압축-전단실험을 수행하였다. 실험은 상온상태에서 해당 설계면압이 유지되도록 일정하게 수직하중을 재하하고, 설계전단변위가 발생하도록 해당 주파수의 정현파를 11회 반복재하 하였다. 실험 주파수는 0.005Hz, 0.01Hz, 0.1Hz, 0.25Hz, 0.5Hz, 0.7Hz등으로 저주파수에서 고주파수 순서로 시험을 수행하였다. 본 실험에서는 시험장비의 속도 제약으로 인하여 0.7Hz이상의 주파수에 대해서는 실험을 실시하지 않았다.

실험결과는 주파수 0.5Hz에서의 값을 기준으로 등가전단강성 및 등가감쇠비를 변화율을 계산하여 그림 3.13, 그림 3.14에 나타내었다.

0.005~0.5Hz의 주파수 범위에서 등가전단강성과 등가감쇠비는 모두 주파수가 증가하는 경향을 나타냈지만, 고감쇠 고무받침(HDRB)의 경우는 상대적으로 그 변화폭이 크게 나타났으며, 납 먼진받침의 경우는 0.25Hz를 기준으로 변화 경향이 크게 달라지는 것을 확인 할 수 있었다.

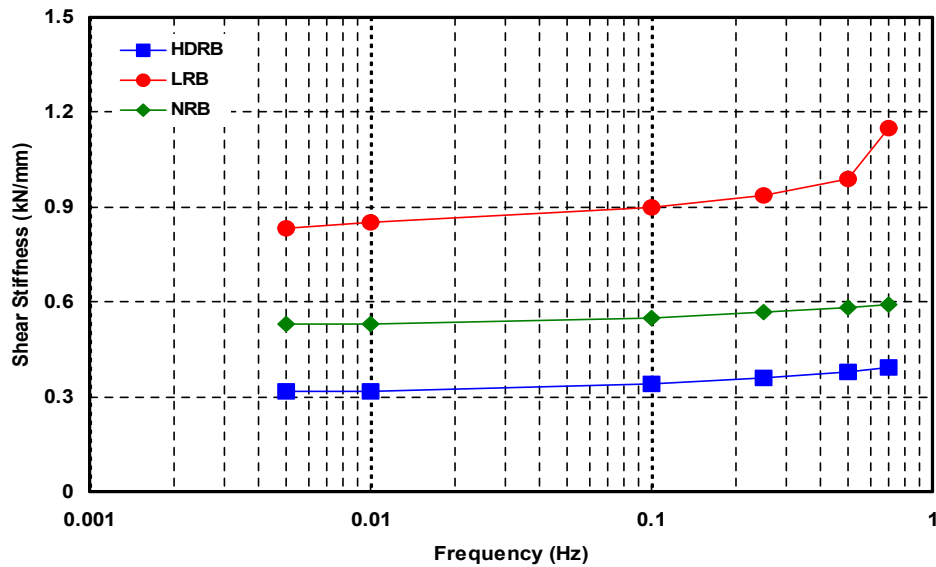


그림 53. 주파수변화에 따른 전단강성의 변화

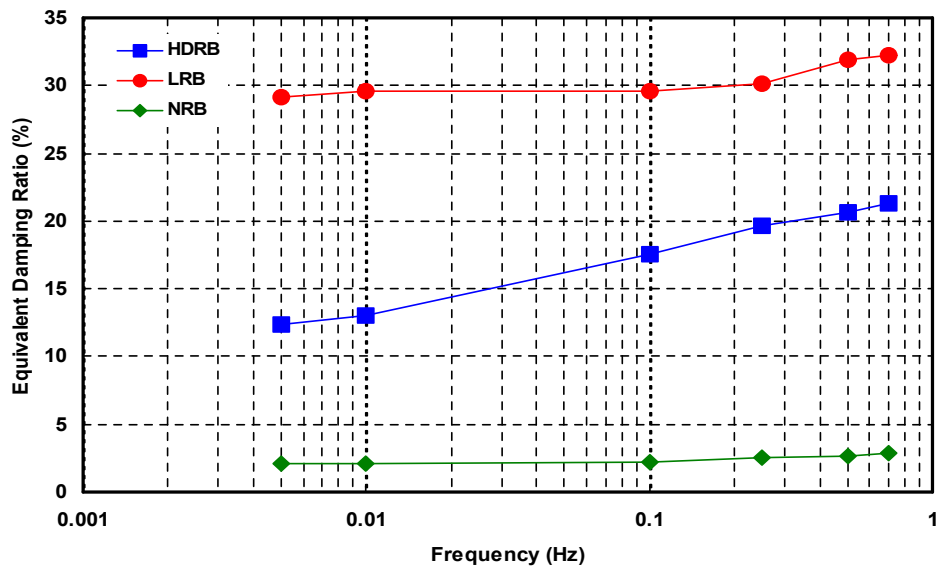


그림 54. 주파수변화에 따른 등가감쇠비의 변화

라. 온도 의존성 실험

온도변화에 따른 등가전단강성과 등가감쇠비의 변화를 파악하기 위하여 다양한 온도에 대하여 압축-전단실험을 그림 3.15와 같이 수행하였다. 실험방법은 전단특성실험 방법과 동일한 조건으로 실시하였으며, 실험온도는 -20℃, 0℃, 23℃, 40℃의 온도상태에서 수행하였다.

해당 온도에서 항온항습기내에 3일간 보관한 시험체를 시험기에 장착하고, 시험기 주변에 항온 챔버를 설치하였다. 이후 저온 실험인 경우 저온을 유지하기 위하여 액체질소를 이용하여 저온을 유지하고, 고온실험인 경우 고온을 유지하기 위해 열풍기를 이용하였다.

실험결과를 온도 23℃에서의 값을 기준으로 증가전단강성 및 증가감쇠비의 변화율을 계산하여 그림 3.16, 그림 3.17과 같이 나타내었다.

온도 -20℃~40℃의 범위에서 증가전단강성은 온도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내었다. 그러나 증가감쇠비의 변화는 다소 감소하였으나 거의 일정하게 유지되었다. 시험체 중에서 고감쇠 고무받침(HDRB)이 다른 시험체에 비해 증가전단강성의 변화가 크게 나타났으며, 이는 다음과 같은 원인에 기인한 것으로 판단된다.

고무와 같은 고분자 재료는 온도에 따라 탄성률이 변화하는데 특히 저온에서는 유리전이점(temperature of glass transition)에서 급격하게 상승한다. 고감쇠 고무의 경우에는 고무의 감쇠 성능을 높이기 위해 가소제 및 연화제, 보강제 등의 다양한 배합약품을 투입하는데 이와 같은 배합약품이 온도의존성을 갖게 하며, 배합약품의 종류와 투입량에 따라서도 크게 변화한다. 일반적으로 고감쇠 고무받침은 천연고무계 고무받침에 비해 비교적 높은 온도의존성을 갖고 있다. 증가전단강성 및 감쇠는 저온일 경우에는 높게 나타나며 고온에서는 낮아지는 경향이 있다.

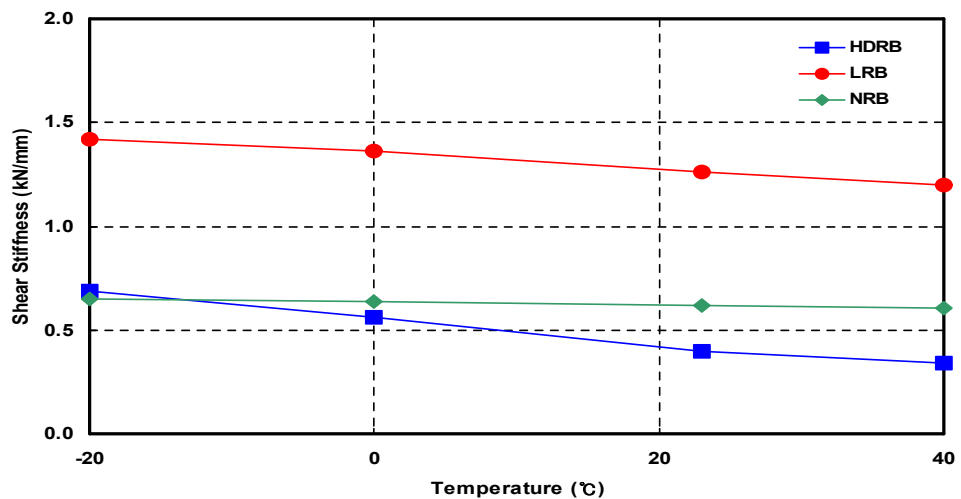


그림 55 온도변화에 따른 전단강성의 변화

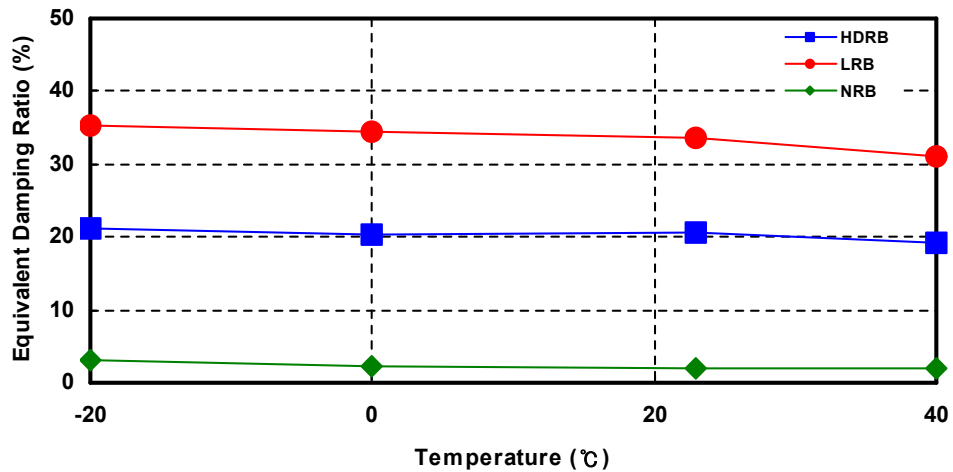


그림 56 온도변화에 따른 등가감쇠비의 변화

마. 반복하중 의존성 실험

반복하중에 따른 등가전단강성과 등가감쇠비의 변화를 파악하기 위하여 반복재하 압축-전단실험을 수행하였다. 실험은 상온에서 설계 면압이 유지되도록 수직하중을 일정하게 재하하고, 해당 설계전단변위로 0.5Hz의 정현파를 50회 반복재하 하였다. 반복재하 횟수의 증가에 따른 각 사이클 별 등가전단강성과 등가감쇠비를 계산하여 전단특성치의 변화양상을 파악하였다. 반복하중에 의한 전단특성 변화를 온도상승에 의한 전단특성 변화와 구별하기 위해, 시험체에 50회 반복하여 전단변위를 가한 후 하중을 가하기 전의 초기온도(initial pre-load temperature)로 냉각시켜 전단특성을 다시 측정하였다.

50회 반복하는 동안 전단특성 변화 추이를 그림 3.18, 그림 3.19와 같이 나타내었다. 초기 1~3번째 사이클에서 등가전단강성은 크게 변화하는 것으로 나타났다. 하지만 그 이후 반복회수부터는 변화 폭이 줄어들어 조금씩 감소하는 양상을 나타냈다. 실험결과 고감쇠 고무받침과 천연고무받침은 납 면진받침에 비하여 그 변화폭이 상대적으로 적으나, 에너지 소산 측면에서는 납 면진고무받침이 가장 우수한 성능을 발휘하였다.

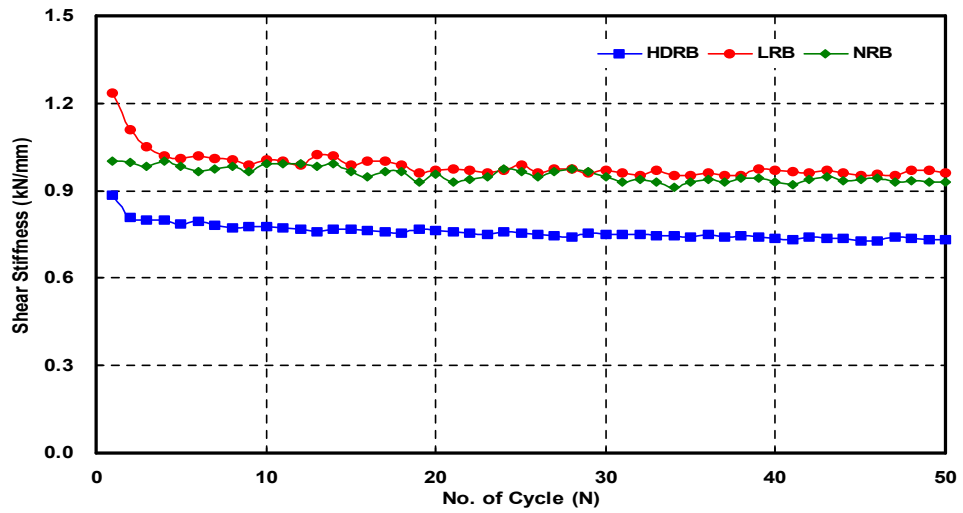


그림 57. 반복횟수에 따른 전단강성의 변화

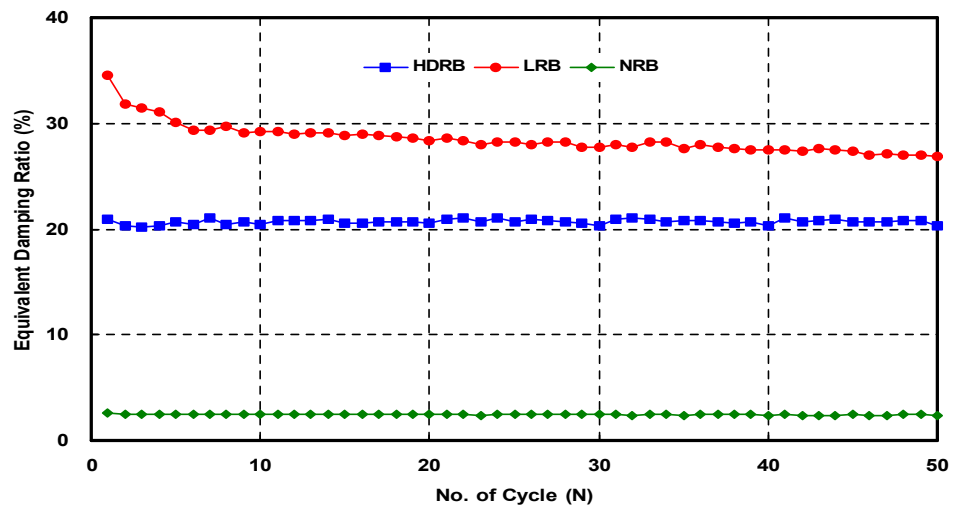


그림 58. 반복횟수에 따른 등가감쇠비의 변화

2. 전단스프링(강재) 수치해석 연구

가. 면진형 디스크받침

폴리우레탄을 이용한 교량받침장치에 대한 특성 및 성능평가에 대한 시험방법 및 평가기준은 아직까지 국내외에 정립되어있지 않고 있는 실정이다. 국외 설계기준(AASHTO, 2007)의 경우에는 내진형 디스크받침에 대한 폴리우레탄 소재 및 설계기준, 특성시험 및 평가기준에 대해서 명기되어져 있다. 그러나 면진형 디스크받침에 설계 및 제작에 대한 언급이 없어, 제작업체의 특별기준에 준하여 시험평가하고 있는 실정이다. 국내의 경우도 국외의 경우와 별반차이가 없는 실정이다. 단지 도로교표준시방서(2005)에 국외의 경우와 같이 내진형 디스크받침에 대해서만 명기되어져 있다.

이에 따라 본 연구에서는 면진형 디스크받침에 대한 특성 및 성능평가를 위하여 AASHTO Guide Spec.(1999)과 ISO 22762(2005)에 준하여 일반적인 지진격리장치에 대한 시험기준을 적용하여 시험을 실시하였다. 본 시험에서도 적층형 고무받침 시험체와 마찬가지로 각종 의존성실험을 실시하였으며, 각종 의존성 시험은 상기의 3.3절과 동일한 방법으로 실시하였다. 의존성 실험결과는 3.4.1절에 다른 지진격리장치와 성능비교 하여 나타냈으며, 그 외의 시험방법은 본 절에서 설명하기로 한다.

(1) 시험방법

(가) 최대 수직하중시험

본 시험방법은 AASHTO(2007)에 따른 시험을 바탕으로 변형된 시험기법으로 예비시험과 본 시험으로 구분되면 최종 시험결과는 본 시험 결과를 토대로 평가 실시한다. 시험 방법은 아래와 같은 순서로 실시한다.

- ① 최소 수직하중을 재하하고 변위계 0점을 잡는다.
- ② 최대 수직하중까지 15kN/sec의 속도로 가압하고 최대 수직하중까지 10분 유지한다.
- ③ 하중을 최소 하중까지 제거하고 10분유지 후 다시 최대 수직하중까지 재하 하여 10분을 유지한다.
- ④ 다시 하중을 최소하중까지 제거하고 10분을 유지한다.
- ⑤ 최대 수직 처짐량과 잔류변위량을 기록한다.

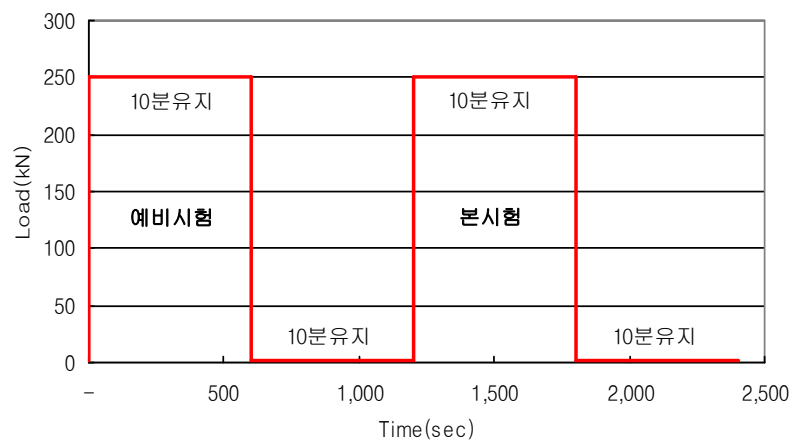


그림 59. 디스크 최대수직하중시험



그림 60. 디스크 받침 시험전경

(나) 최대 수직하중의 150%하중과 설계회전 시험

본 시험방법은 도로교표준시방서(2005)에 따른 시험법으로 수직 하중과 허용회전량을 모두 고려한 시험으로 예비구간과 본시험 구간으로 구분되면 최종 시험결과는 본 시험 결과를 토대로 평가 실시한다. 시험 방법은 아래와 같은 순서로 실시한다.

- ① 최대 하중의 150%에 해당하는 수직하중과 설계회전용량 (0.02rad) 경사판을 설치한다.
- ② 최대 하중의 150%에 해당하는 수직하중을 재하 후 10분간 유지한다.
- ③ 수직 하중을 제거 후 10분간 유지한다.
- ④ 최대 하중의 150%에 해당하는 하중을 5등분하여 각 등분에서 2분씩 유지하면서 하중을 증가시킨다.
- ⑤ 최대 하중의 150%에 해당하는 하중을 60분간 유지 후 (3)의 역 순으로 하중을 제거한다.
- ⑥ 하중제거 후 10분간 유지한다.
- ⑦ 최대 수직 처짐량과 잔류변위량을 기록한다.

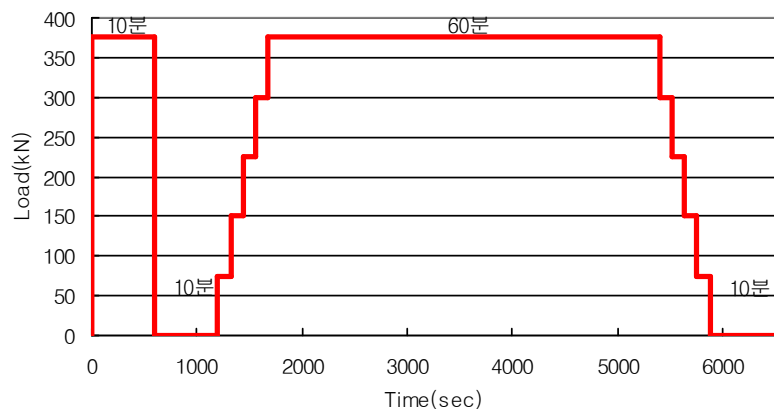


그림 61. 최대수직하중의 150%하중 및 설계회전시험

(2) 성능시험 평가기준 및 규정

(가) 도로교 표준시방서 (2005)

① 성능시험

시험용 받침은 1시간동안 설계용량의 150%까지 하중과 0.02rad의 회전과 설계회전용량 중에서 큰 회전을 함께 가해서 실시한다.

② 시험 후 검사기준

1. 받침은 시험동안 그리고 시험 후에 분해하여 육안으로 검사해야한다.
2. 돌출되거나 변형된 폴리에테르 우레탄 또는 PTFE, 또는 균열이 발생한 강재등과 같이 육안으로 관찰되는 결함은 불합격 원인이 된다.
3. 시험하는 동안에 폴리에테르 우레탄 요소와 받침판 사이에서 그리고 상부 미끄럼 강판과 상부 받침판 사이에서 연속적이고 균일한 접촉이 유지되어야 한다. 들뜬 것이 발견되면 이것은 해당 로트의 불합격 요인이 된다.

(나) AASHTO LRFD Bridge Design Specification (2004)

Its instantaneous deflection under total load does not exceed 10 percent of the thickness of the unstressed disc, and the additional deflection due to creep does not exceed 8 percent of the thickness of the unstressed disc;

【해설】 총 하중에 의한 초기 처짐은 무 응력상태의 디스크 두께의 10%를 넘지 않고, 크리프에 의한 추가 처짐은 무 응력상태의 디스크 두께의 8%를 넘지 않아야 한다.

The component of the bearing do not lift off each other at any location; and

【해설】 받침의 부재들은 어느 위치에서도 부상되지 않아야 한다.

The average compressive stress on the disc does not exceed 35MPa. If the outer surface of the disc is not vertical, the stress shall be computed using the smallest plan area of the disc.

【해설】 디스크의 평균압축응력은 35MPa을 넘지 않아야 한다. 만약 디스크의 외부면이 수직이 아닌 경우 응력은 디스크의 가장 작은 평면적을 사용하여 구한다.

(3) 시험결과

(가) 최대수직하중시험

본 시험은 AASHTO LRFD(2007)에 따른 시험을 바탕으로 변형된 시험기법으로 예비시험과 본 시험으로 구분되면 최종 시험결과는 본 시험 결과를 토대로 평가 실시한다.

구 분	예비 시험구간		본 시험구간		허 용 기준치 (mm)	시험 후 Disk상태
하중재하조건	1000kN	100kN	1000kN	100kN		
시험결과	max	min	max	min		
변형량(mm)	3.14	0.32	3.20	0.40	3.5	상태양호

표 18. 최대 수직하중 시험

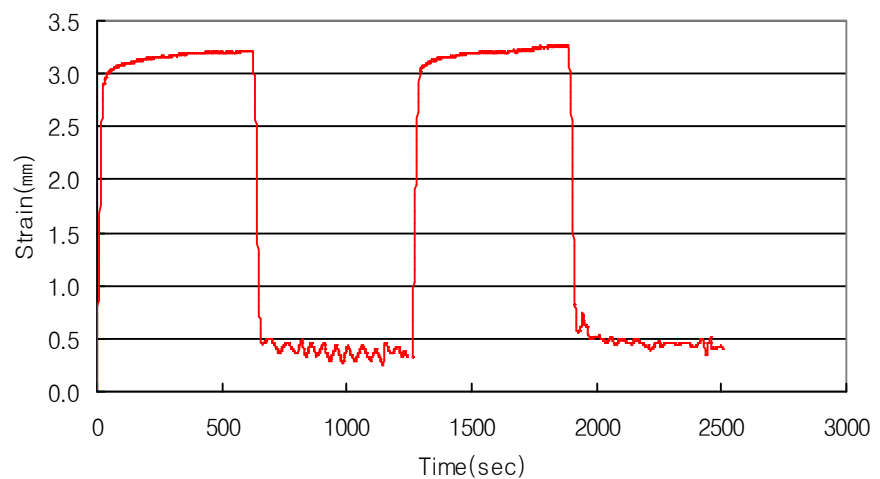


그림 62. 시간-변위 곡선(1000kN)

설계하중 1000kN인 폴리우레탄 디스크에 대한 최대수직하중 시험결과 표 118과 그림 147과 같은 결과를 얻었다. AASHTO LRFD(2007)의 시험방법과 평가기준이 따른 시험법으로서 허용기준치 3.5mm 이내로 처짐이 발생함으로서 성능기준을 만족하는 것으로 판단된다.

(나) 최대수직하중의 150%재하 및 허용회전각 시험

본 시험법은 도로교표준시방서를 기준한 시험법으로 시험용 받침은 1시간동안 설계용량의 150%까지 하중과 0.02rad의 회전과 설계회전용량 중에서 큰 회전을 함께 가해서 실시한다.

구 분	예비 시험구간		본 시험구간			시험 후 Disk상태
하중재하조건	6750kN	100kN	6750kN	6750kN	100kN	
시험결과	max	min	max	Creep	min	
변형량(mm)	4.623	0.979	4.521	4.718	1.065	이상 없음

표 19. 최대수직하중의 150%재하 및 허용회전각 시험

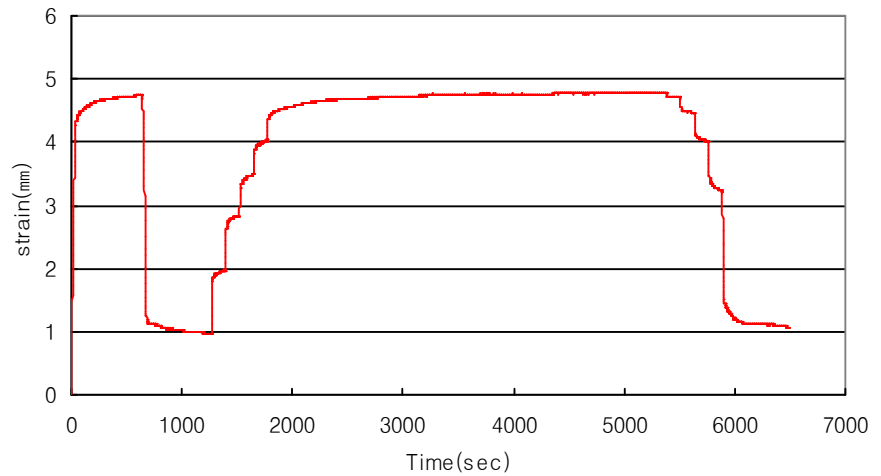


그림 63. 시간-변위 곡선(1500kN)

폴리우레탄 디스크에 설계하중의 150%인 1500kN의 하중을 수직 재하하고 동시에 회전각(0.02rad)만큼 추가 하중을 주어 시험한 결과 표 3.5와 그림 3.24와 같은 결과를 얻었다. 이 시험은 정성적 평가로서 시험 전과 시험 후에 폴리우레탄 디스크의 외관상태를 육안점검 하는 것으로서 시험 전후 폴리우레탄 디스크의 육안 조사결과 결함이라 할 수 있는 균열이나 찢어짐 등의 변상이 발생하지 않아 성능기준을 만족하는 것으로 판단된다.

3. 전단스프링(탄소 섬유 또는 탄소봉) 수치해석 연구

가. 탄소섬유 또는 탄소봉에 대해서는 내구성은 우수하나, 면진기능에 대해 검증이 되지 않았으며, 에너지 소산기능과 복원기능이 없으므로 면진장치로서는 적절치 않다고 판단된다.

제4절 적용대상의 연구

1. 말뚝 적용 대상

가. 본 연구과제는 수구경 말뚝을 적용대상으로 하며, 강관말뚝과 PHC말뚝의 제원은 아래와 같다.

나. 말뚝 재질별 분류

(1) 강관말뚝

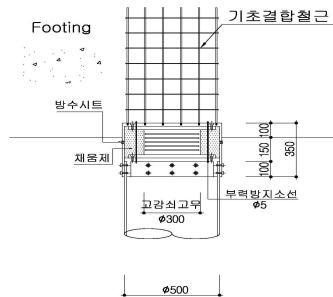
외경(mm)	두께(mm)	단면적(cm ²)	저항모멘트(tm)	m당 중량(kg)
406.4	6.0	75.47	10.42	59.2
	7.0	87.83	12.07	68.9
	8.0	100.13	13.70	78.5
	9.0	112.36	15.29	88.2
	10.0	124.50	16.83	97.8
	11.0	136.60	18.48	107.0
	12.0	148.70	20.02	117.0
500.0	6.0	93.12	15.96	73.1
	7.0	108.40	18.48	85.1
	8.0	123.70	21.00	97.1
	9.0	138.80	23.40	109.0
	10.0	153.90	25.90	121.0
	11.0	169.00	28.28	133.0
	12.0	184.00	30.70	144.0

(2) PHC 말뚝

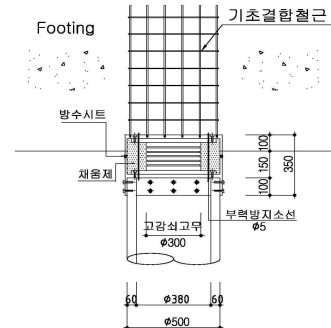
외경(mm)	두께(mm)	종류	휨강도(tm)		m당 중량(kg)
			균열	파괴	
400	65	A	5.5	8.3	178
		B	7.5	13.5	
		C	9.0	18.0	
450	70	A	7.5	11.3	217
		B	11.0	19.8	
		C	12.5	25.0	
500	80	A	10.5	15.8	274
		B	15.0	27.0	
		C	17.0	34.0	
600	90	A	17.0	25.5	375
		B	25.0	45.0	
		C	29.0	58.0	

(가) 말뚝두부면진 장치의 적용은 강관 및 PHC 소구경 말뚝에 적용계획

2. 말뚝 재질별 정착방안 - 말뚝 재질별의 정착방안중 강관말뚝은 기존의 말뚝두 부보강을 응용하였으므로 적용이 용이하며 , PHC말뚝은 강관말뚝과 동일한 방법으로 정착할 수 있다.



강관 : 말뚝과 볼트체결로
정착용이

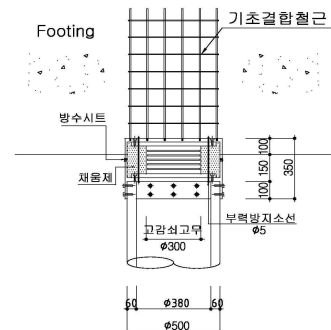


PHC : 말뚝과 볼트체결로
정착용이

3. PHC 말뚝의 정착방안 고안 - 복합말뚝의 결합방법을 응용하였으며 강관말뚝의 정착방안과 동일하다.



착안공법 : 복합말뚝의
결합방법



PHC말뚝 정착

4. 직접기초에 대한 적용은 암반에 비균일 지지되어 있는 기초의 보강을 응용한 것으로 베드콘크리트위에 본 제품을 설치하는 것으로 한다.

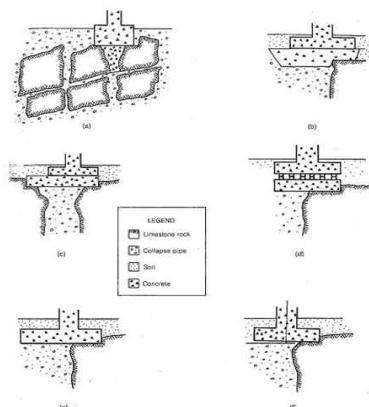
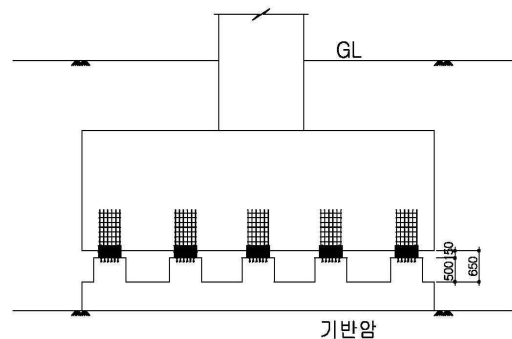


Figure 8.7 Examples of construction procedures for spread footings on karstic terrain (after Katzenbach and Koenig, 1987): (a) concrete plug; (b) partial replacement of collapse material with concrete; (c) footing supported by underground bridge; (d) shallow foundation with screw jacks for adjustment; (e) load eccentricity; and (f) inclination of pier.

착안공법 : Foundation on Rock



직접기초 정착

제5절 타당성(경제성) 및 적합성 연구

1. 타당성(경제성) 및 적합성

연구목표별 Activity	주요 성과지표	타당성(경제성) 및 적합성
힌지구조계 연구	라멘교 힌지거동 구조계산	지하구조물인 2연 박스구조물(직접기초)에 적용성을 검토한 결과 매우 우수한 면진기능을 보인 것으로 분석되었음 (벽체하단의 모멘트 저감효과 26~30%)
	PSC Box 교 힌지 거동 구조계산	본 연구의 말뚝두부면진은 강결구조에서 말뚝상단이 힌지구조계가 될 경우 말뚝의 본체응력은 매우 작게 상승하여 안전성에는 이상이 없음을 확인함 말뚝두부면진장치의 강상형교량과 콘크리트 교량인 PSC 교량에 대한 적용성을 검토한 결과 매우 우수한 면진기능을 보인 것으로 분석되었음 (강교 기둥하단의 모멘트 저감 10~35%) (콘크리트교 기둥하단의 모멘트 저감 7~11%)
	건축물 힌지거동 구조계산	건축물(직접기초)에 대한 말뚝두부면진을 설치시 면진기능이 우수한 것으로 분석되었음(지하실 기둥하단의 모멘트 저감 17~20%)
전단스프링 연구	전단스프링 (탄성고무) 수치해석	고무면진계열인 납면진 (LRB)과 고감쇠 고무 (HDRB) 2가지 TYPE에 대해 전단스프링을 연구한 결과 면진기능이 우수하고 방수처리가 양호해 내구성이 우수하므로 가장적절하다고 판단
	전단스프링 (강재) 수치해석	강재면진계열인(EDS)에 대해 검토한 결과 면진기능은 우수하나 방수처리가 불리하여 내구성이 저하되므로 적절하지 않음
	전단스프링 (탄소 섬유 또는 탄소봉)	탄소섬유 또는 탄소봉에 대해서는 내구성은 우수하나, 면진기능에 대해 검증이 되지 않았으며, 에너지 소산기능과 복원기능이 없으므로 면진장치로서는 적절치 않다고 판단됨
기술검증	타당성 (경제성) 및 적합성	말뚝두부면진장치가 말뚝기초(주로 강관말뚝과 PHC 말뚝같은 소구경말뚝)나 직접기초의 면진기능으로 쓰일 경우 리히터 규모 5.5이상의 강진에 대해서 추가적인 구조물의 내진 안전성확보 가능. 경제적 타당성은 구조물별로 면진성능의 발효치는 각기 다르지만 본 말뚝면진두부면진장치가 대량생산이 될 경우 경제적가치가 탁월하다고 판단됨

2. 경제성 및 타당성 연구연구

가. 각 구조물 별 경제성 분석을 각 구조물별 해석 결과에 따라 수록하였다.
경제성분석의 근거를 또한 수록하였다

(1) 마포대교

마포대교 램프 A 공사비 절감

일반내진해석

번호	직경	형태 TYPE	길이 m	개수 ea	총길이 m	단위중량 (kgf/m)	총중량 (tonf)	비고 (할증)	단가 (원)	공사비 (원)
	H32		9.890	366	3,619.740					
	"									
	소 계				3,619.740	6.230	22.551	23.904		
	H29									
	"									
	소 계					5.040				
	H25									
	"									
	소 계					3.980				
C2	H22		15.340	203	3,106.350					
C3	"		27.010	203	5,469.525					
	소 계				8,575.875	3.040	26.071	27.635		
	H19	-								
	"	-								
	소 계					2.250				
	H16	-								
	"	-								
	소 계					1.560				
	H13									
	"									
	소 계					0.995				
	철근합계						48.622	51.539	1,928,500	99,392,843
	띠철근 커플러			203				203	12,325	2,495,813
	말뚝두부보강(일반)			75				75	290,000	21,750,000
	합 계						97.243	380.578		123,638,656

말뚝두부보강사용시

번호	직경	형태 TYPE	길이 m	개수 ea	총길이 m	단위중량 (kgf/m)	총중량 (tonf)	비고 (할증)		공사비 (원)
	H32		9.890	366	3,619.740					
	"									
	소 계				3,619.740	6.230	22.551	23.904		
	H29									
	"									
	소 계					5.040				
	H25									
	"									
	소 계					3.980				
C2	H22									
C3	"									
	소 계					3.040				
	H19	-								
	"	-								
	소 계					2.250				
	H16	-	15.340	68	1,043.120					
	"	-								
	소 계				1,043.120	1.560	1.627	1.676		
	H13		27.010	68	1,836.680					
	"									
	소 계				1,836.680	0.995	1.827	1.882		
	철근합계						26.006	27.462		51,736,240
	말뚝두부보강(면진)			75				75	1,000,000	75,000,000
	교량발침 수평력감소			20				20	-1,450,000	- 29,000,000
	합 계						52.011	129.925		97,736,240

감소액 - 25,902,415

본 제품 사용전 유지보수비

유지보수비용	100년1회							
교량발침 교체	20					20	6,000,000	120,000,000
								-
								-
합 계						81.472	255.946	120,000,000

말뚝두부면진 사용시 유지보수비

유지보수비용	100년1회							
가시설	5					5	20,000,000	100,000,000
작업	75					75	100,000	7,500,000
전면교체시	75						1,000,000	-
합 계						162.944	531.891	107,500,000

(2) 암기교

암기교 공사비 절감										
교량면진발침						일반내진해석				
번호	직경	형태	길이	개수	총길이	단위중량	총중량	비고	단가 (원)	공사비 (원)
		TYPE	m	ea	m	(kgf/m)	(tonf)	(할증)		
	H32									
	"									
	소 계					6.230				
	H29		30.397	420	12,766.740					
	"									
	소 계				12,766.740	5.040	64.344	68.205		
	H25		8.796	207	1,820.772					
	"									
	소 계				1,820.772	3.980	7.247	7.681		
	H22									
	"									
	소 계					3.040				
	H19	-								
	"	-								
	소 계					2.250				
	H16	-								
	"	-								
	소 계					1.560				
	H13									
	"									
	소 계					0.995				
	철근합계						71.591	75.887	1,928,500	146,347,124
	띠철근 커플러			207				207	12,325	2,551,275
	말뚝두부보강(일반)			72				72	290,000	20,880,000
	합 계						143.182	430.773		169,778,399

교량면진발침						말뚝두부보강사용시				
번호	직경	형태	길이	개수	총길이	단위중량	총중량	비고		공사비 (원)
		TYPE	m	ea	m	(kgf/m)	(tonf)	(할증)		
	H32									
	"									
	소 계					6.230				
	H29		30.397	420	12,766.740					
	"									
	소 계				12,766.740	5.040	64.344	68.205		
	H25									
	"									
	소 계					3.980				
	H22									
	"									
	소 계					3.040				
	H19	-								
	"	-								
	소 계					2.250				
	H16	-	8.796	52	455.193					
	"	-								
	소 계				455.193	1.560	0.710	0.731		
	H13			68						
	"									
	소 계					0.995				
	철근합계						65.054	68.936		129,679,184
	말뚝두부보강(면진)			108				108	1,000,000	108,000,000
	교량발침 수평력감소									-
	합 계						130.109	245.873		237,679,184

교량내진발침									말뚝두부보강사용시	
번호	직경	형태 TYPE	길이 m	개수 ea	총길이 m	단위중량 (kgf/m)	총중량 (tonf)	비고 (할증)		공사비 (원)
	H32									
	"									
	소 계					6.230				
	H29		30.397	420	12,766.740					
	"									
	소 계				12,766.740	5.040	64.344	68.205		
	H25		8.796	207	1,820.772					
	"									
	소 계				1,820.772	3.980	7.247	7.681		
	H22									
	"									
	소 계					3.040				
	H19	-								
	"	-								
	소 계					2.250				
	H16	-								
	"	-								
	소 계					1.560				
	H13									
	"									
	소 계					0.995				
	철근합계						71.591	75.887		142,734,640
	말뚝두부보강(면진)			108				108	1,000,000	108,000,000
	띠철근 카플러			207				207	12,325	2,551,275
	교량 내진발침			80				80	-2,000,000	-160,000,000
	합 계						143.182	259.773		93,285,915

감소액 1안,3안 - 76,492,484

본 제품 사용전 유지보수비

유지보수비용	100년1회									-
교량발침 교체			80					80	5,000,000	400,000,000
										-
										-
합 계							214.773	730.660		400,000,000

말뚝두부면진 사용시 유지보수비

유지보수비용	100년1회									-
가시설			5					5	60,000,000	300,000,000
작업			108					108	100,000	10,800,000
전면교체시			108					108		-
합 계							429.546	1,541.319		310,800,000

(3) 건축물

건축물 공사비 절감

일반내진해석									
번호	직경	형태 TYPE	길이 m	개수 ea	총길이 m	단위중량 (kgf/m)	총중량 (tonf)	비고 (할증)	공사비 (원)
	기둥 H-900*300					240	2,320	2,552	6,290,680,000
	합 계						2,320.000	2,552.000	6,290,680,000

말뚝두부보강사용시									
번호	직경	형태 TYPE	길이 m	개수 ea	총길이 m	단위중량 (kgf/m)	총중량 (tonf)	비고 (할증)	공사비 (원)
	기둥 H-900*300					185	1,878	2,066	5,092,619,994
	말뚝두부보강(면진)			288				288	1,000,000
	면진베드콘크리트	10x10x1.0		32				32	5,000,000
	합 계						1,878.156	2,353.972	5,540,619,994

감소액 - 750,060,006

본 제품 사용전 유지보수비

유지보수비용	100년1회									-
추정 물가										-
										-
합 계										-

말뚝두부면진 사용시 유지보수비

유지보수비용	100년1회									-
유지관리실 시공비			32					32	10,000,000	320,000,000
작업			288					288	100,000	28,800,000
전면교체시			288					288	1,000,000	288,000,000
합 계							8,396.312	9,843.943		636,800,000

제6절 지진격리장치의 적용성 검토

1. 개요

교량이나 건축물의 기초에 사용되는 기초말뚝의 두부에 지진격리장치를 설치하여 기초하부를 면진화 함으로서 구조물의 안전성을 향상시킬 수 있다. 기존의 기초말뚝의 지진 발생시 변형거동과 말뚝두부 면진보강을 통한 안전성 확보측면에서 상호비교하고 이에 적합한 면진장치의 적용성을 파악한다.

2. 말뚝기초의 내진설계

말뚝은 구조물의 기초공으로 이용하거나 교각과 기초의 양자를 일체화 시키는 구조로서 이용된다. 매우 긴 말뚝을 제작 및 타입할 수 있고 연약지반에 건설하는 구조물에 널리 이용되고 있다. 말뚝의 연직지지력은 근입을 깊게 할수록 증가하지만 말뚝의 수평방향의 강성은 작아지면 이것이 내진설계를 어렵게 하는 점이다.

연약지반은 심하게 진동하면 지표부근의 흙은 가끔 액상화되며, 전단저항을 잃어 말뚝의 수평안정이 감소한다. 그 결과 말뚝의 균열, 파괴 등을 유발하며 구조물에 중요한 문제를 일으킨다. 지반의 액상화는 지진시 말뚝기초의 주요 피해 원인이다. 액상화의 위험성에 대하여 지반의 강도증진이나 지반에 말뚝기초의 바닥을 깊게 해야 한다. 지진시 지반이 액상화하지 않는다는 것이 확인되면 말뚝기초의 응력 및 말뚝기초의 변위는 축 변위에 관한 스프링, 횡 변위에 관한 스프링과 회전에 관한 스프링은 말뚝머리에 연결되어 있다고 가정하고 계산한다. 또한 상부구조에 작용하는 지진하중은 이들 스프링이 지지되어 있다고 가정한다.

3. 지진시 말뚝기초의 거동

일반적으로 교량이나 건축구조물에서 지진 발생에 의한 피해가 발생하면 각 구조부재별로 각각 내진성능보강과 같은 대책이 많이 있다. 그러나 상부구조물을 지지하고 상부하중을 지중으로 전달하는 역할을 하는 기초의 경우는 땅속에 묻혀있어 이에 대한 대책을 거의 없는 실정이다.

말뚝기초의 내진설계시 수직응력과 수평응력을 고려하고 기초의 구조적 성질 등을 고려하여 설계해야한다. 지진시 수직하중은 기초파일의 그룹형태(독립기초, 확대기초 등)와 설치위치 그리고 상부구조물 종류에 따라 서로상호관계가 있다. 구조물의 기초파일 중 모서리나 구석에 설치된 파일의 경우 지진이 발생하는 동안 압축응력뿐만 아니라 큰 인장력도 발생하게 된다. 이에 따라 그림 5.1과 같이 모서리에 설치된 경사 파일의 경우 좌굴 또는 극한 굴곡이 파일에 발생하게 된다. 또한 말뚝두부에 균열이나 펀칭액션(punching action) 등이 발생하여 말뚝과 기초사이에서 심각한 손상을 유발한다.

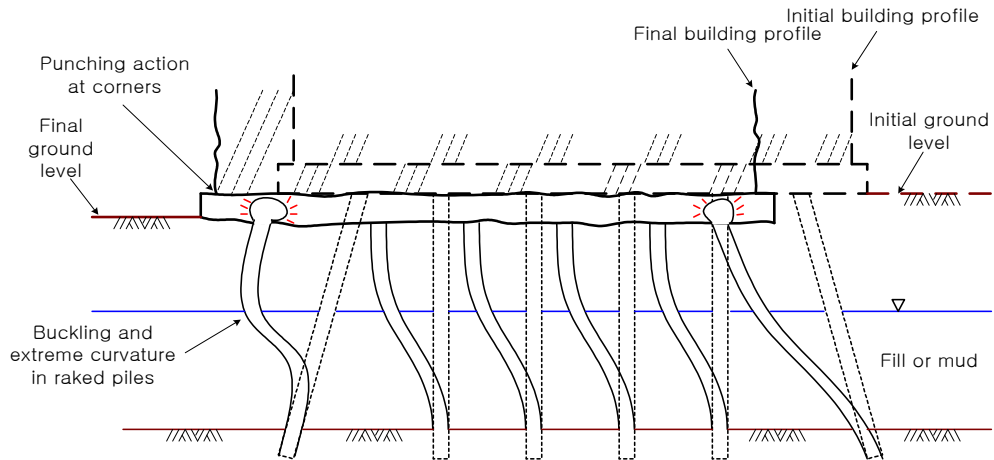


그림 64. 지진시 기존 기초말뚝의 변형거동

그러나 본 연구에서와 같이 말뚝기초 두부에 지진격리장치를 설치하여 말뚝과 기초를 기초 분리시킬 경우 말뚝기초의 지진시 과다변위를 감소 시킬 수 있다. 뿐만 아니라 말뚝두부에 설치된 지진격리장치에 의해서 지진시 전단변위거동을 하고 에너지를 소산함으로써 상부구조물과 기초파일의 안정성을 향상할 수 있다.

또한 기존 말뚝기초에서 발생하는 말뚝의 좌굴을 방지할 수 있다. 그림 5.2는 지진격리장치에 의한 말뚝기초 지진시 거동을 나타낸 것이다.

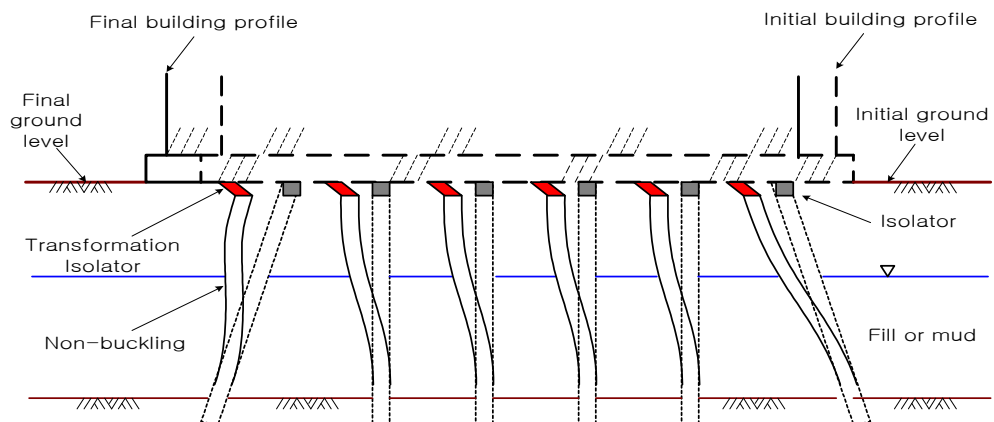


그림 65. 지진격리장치를 설치한 말뚝기초의 지진시 거동

4. 지진격리장치 정착방안검토

가. 기존 말뚝두부 보강기술

(1) 말뚝의 적용범위

말뚝기초의 용도는 다양하지만 크게 구분하면 교량의 기초, 항만 및 하천 구조물의 기초, 건축물의 기초 등으로 나눌 수 있다. 그림 5.3과 같이 교량에 사용하는 기초는 도로교 및 철도교 또는 입체교차로 등의 교각 및 교대 기초에 사용되고, 건축물에서는 건물이나 기계장비, 옹벽, 각종 고로탱크, 경기장 등에 사용된다.

또한 하천 구조물의 기초나 하천옹벽 및 선창(높은 곳에 오르내리기 위해 설치된 경사진 널비계), 돌핀(dolphin), 방파제, dock, 선대(선체를 올려 놓는 대), 수문기초, 하천옹벽, 크레인 기초 등에 사용된다. 그 외에도 토사방지 말뚝이나 산 사태방지 말뚝, 토중 연속벽 등과 같이 널리 사용되고 있다(강관말뚝기초 가이드북, 한국철강협회).

(2) 말뚝의 종류 및 차이점

강관말뚝과 PHC말뚝의 차이는 크게 재료의 성능과 구조적 성능으로 구분가능하다. 이와 같이 각 성능의 차이점에 대하여 정리하면 다음과 같이 비교할 수 있다.

(가) 재료의 성능

① 기계적 성능(설계치수)

강관말뚝			PHC말뚝		
항 목	기준치		항 목	기준치	
	SKK400	SKK490		A종	B종 C종
인장강도(MPa)	410	500	인장강도(MPa)	5.5	
항복점(MPa)	240	320	압축파괴강도(MPa)	80	
연신율(%)	18	18	압축파괴변형(%)	0.25	
탄성계수(MPa)	120,000		탄성계수(MPa) (Prestress 도입시)	35,000	

② 허용응력도

항 목	강관말뚝		PHC말뚝		
	SKK400	SKK490	A종	B종	C종
압축응력도(MPa)	140	190	20	20	20
휨인장응력도(MPa)	140	190	10	20	20
전단응력도(MPa)	80	110	12	12	12

③ 표준성능

강관말뚝					PHC말뚝				
외경 (mm)	두께 (mm)	종류	허용축 하중(tf)	단위중량 (kgf/m)	외경 (mm)	두께 (mm)	종류	허용축 하중(tf)	단위중량 (kgf/m)
406.4	9	SKK400	123	88	400	65	A	109	180
508.0	12	SKK400	223	147	500	80		169	270
609.6	14	SKK400	302	206	600	90		231	380

(나) 강관말뚝과 PHC말뚝 성능비교

구분		강관말뚝	PHC말뚝
항타 할때의 내력	압축강도	큰 내력을 얻을수 있음	두께가 두께워서 강관말뚝과 비슷
	인장강도	내력이 큼	상당한 내력에 버틸 수 있지만 파손되기 쉬움
지지력		지지력이 큼	지지력은 중간
항타 성능		N값 차가 큰 장소에서도 뚫는 것이 가능	강관말뚝에 비교해 떨어짐
장착시공		장착 시공이 가능 (시공예 $\phi 1200$, $\ell = 178\text{m}$)	30m이하가 대다수
말뚝 단면적		순단면이 작아서 내리치는 저항이 적음	말뚝 단면이 큼 (강관말뚝에 비해 두께는 약 10배)
항타길이 조절의 용이		가스절단, 용접이 가능	현장에서의 길이 조절이 어려움
말뚝두부처리		용접처리가 가능	용접 처리가 불가능
운반		PHC에 비교해 자체 무게가 가벼워 운동이 용이	강관말뚝에 비해 중량이 커 운반이 어려움

(3) 기초와 말뚝의 결합방법

토목구조물에서는 거의 말뚝머리 강결의 가정으로 계산되지만 이 가정을 만족시키는 말뚝두부머리부와 기초와의 결합법에 관해서는 다음 두 가지 방법이 있다(그림 5.4). 이와 같이 접합방법에 따라 채택하여 시공하는 것이 보통이다.

방법 1 : 기초(footing)중에 말뚝을 일정 길이만큼 매입하고 매입한 부분에 의해서 말뚝머리 구속모멘트에 저항하는 공법이다.

방법 2 : 기초내부로의 말뚝의 매입길이는 작지만 주로 철근으로 보강해서 말뚝머리구속모멘트에 저항하는 방법이다.

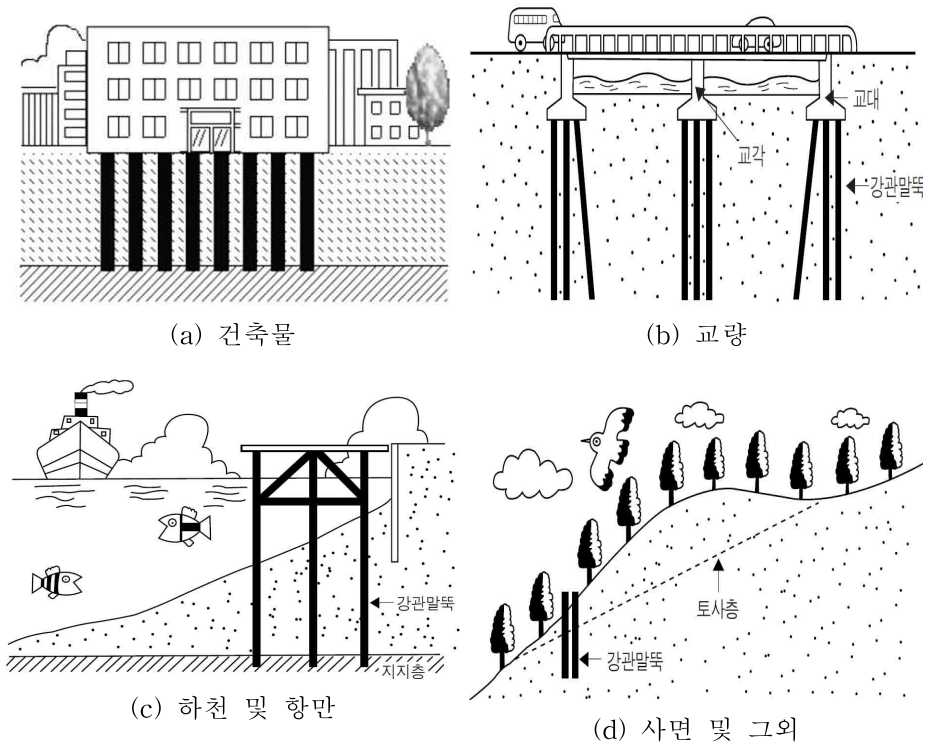


표 27. 말뚝기초 사용범위

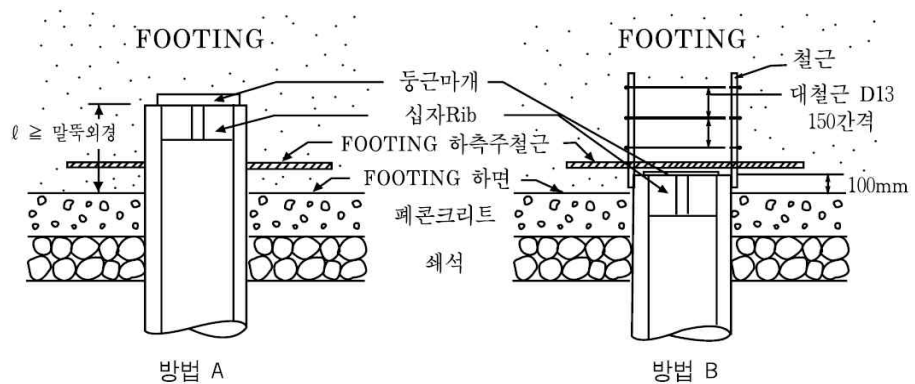


그림 66. 기초와 말뚝의 결합방법

(4) 말뚝두부 강결 방법

말뚝머리에 대한 강결 방법은 아래 그림 5.5와 같이 두 가지 방법으로 구별가능하다. 이것은 말뚝머리부에 작용하는 압입력 혹은 인발력, 수평력 및 모멘트의 모든 것에 저항 할 수 있는 구조로 하여야 한다. 상기의 방법을 사용하면 수평력이 걸릴때의 최대휨 모멘트는 보통 말뚝머리에서 발생한다. 이것에 대해서 말뚝머리힌지 라고하는 것은 압입력, 인발력, 수평력에는 저항하지만 모멘트에 대해서는 저항하지 않는 구조이다. 힌지 결합은 현재 보통의 말뚝기초에서는 이용되지 않지만 구조물서는 아래 그림 5.6과 같은 형상이다. 이와 같은 방법에 따라 현재 국내외에서 적용되고 있는 주요공법을 대상으로 개괄적으로 요약하면 표 5.1과 같다.

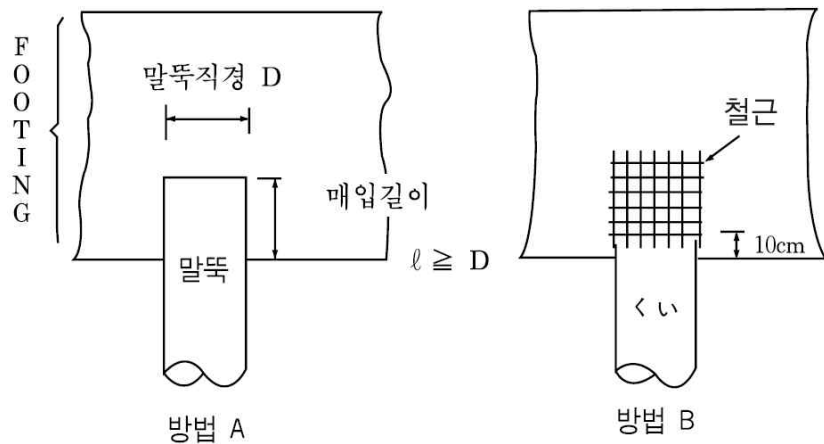


그림 67. 말뚝머리 강결 방법

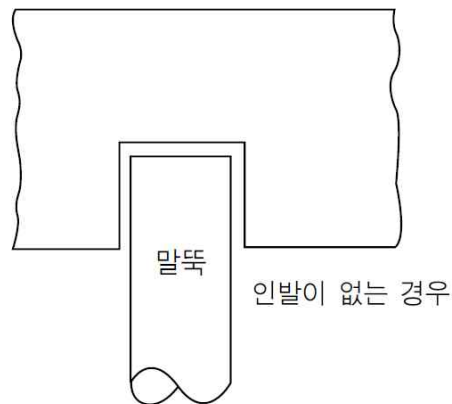


그림 68. 말뚝머리인지

나. 지진격리장치 적용성 분석

본 연구는 지진격리장치를 말뚝두부에 설치하여 말뚝두부보강 효과와 동시에 지진시 상부구조물과 지진동을 분리함으로써 상부구조물의 지진피해를 최소화하는데 주요 목적을 두고 있다. 이에 따라 본 절에서는 말뚝기초에 적용 가능한 지진격리장치(납 면진받침, 고감쇠 고무받침, 면진형 디스크받침)를 대상으로 기초특성시험 및 면진해석을 통하여 그 적용성을 검토하였다. 뿐만 아니라 지진격리장치별 사용성 및 유지관리 기능을 구분하여 그 적합성을 분석하였다. 표 5.1은 지진격리장치별로 그 적용성을 비교분석한 것이다.

적용 가능한 지진격리장치로는 납 면진받침, 고감쇠 고무받침, 천연고무받침, 면진형 디스크받침으로 1차적으로 선정하였다. 상기의 지진격리받침 중 납 면진받침은 현재 국내에서 가장 많이 지진격리설계 교량에 적용되었고, 국내뿐만 아니라 국외에서도 그 사용이 보편화 된 받침이다. 고감쇠 고무받침은 일본을 중심으로 개발되었어 사용되고 있으며, 현재는 국내에서도 국산화 개발되어 점차 그 적용이 증가하고 있는 실정이다.

마지막으로 면진형 디스크받침은 미국에서 내진형 디스크받침으로 최초 개발되어 내진교량에 주로 사용되다가 최근에 간격조절기능의 탄성복원체를 부착하여 면진형으로 개량 개발된 받침이다. 표 5.2에서와 같이 납면진받침이 다른 지진격리장치에 비하여 성능이 우수하고 이에 대한 연구개발 자료와 적용경험이 풍부하여 가장 안전할 것으로 기대된다.

종 류 구 분		납 면진받침 (Lead Rubber Bearing)	고감쇠 고무받침 (High Damping Rubber Bearing)	면진형 디스크받침 (Energy Dissipate Systems)
사 용 성	상 시	·진동/소음 완충효과 있음	·진동/소음 완충효과 있음	·진동/소음 완충효과 없음
	지진시	·복원력 우수 ·상하방향 지진 대응성 우수 ·방향성 없음	·복원력 우수 ·상하방향 지진 대응성 우수 ·방향성 없음	·복원력 보통 ·상하방향 지진 대응성 결여 ·방향성 있음 (사방향 거동시 불리)
유지관리		·유지보수 불필요 ·회전에 대한 안전성 우수	·유지보수 불필요 ·회전에 대한 안전성 우수	·PTFE 교체 필요 ·회전에 대한 안전성 결여
특성시험		·지진거동특성 우수	·지진거동특성 양호	·지진거동특성 양호
면진해석		·지진저감력 우수	·지진저감력 우수	·지진저감력 우수
적용성		·적용실적 많음	·적용실적 미비	·적용실적 미비

표 20. 지진격리장치의 적용성 비교

다. 지진격리장치 정착방안

기초말뚝면진보강 시스템은 기존 교량설계법과 달리 말뚝기초(강관, 콘크리트) 상부와 기초하부에 지진격리장치를 설치(LRB, HDRB, EQS)한다. 말뚝 두부에 면진장치를 설치하여 말뚝두부 보강 및 말뚝두부에서의 내진성능을 개선한다.

(1) 주요구성 및 기능

기초말뚝두부보강 및 면진시스템의 일반적인 개요는 그림 5.7과 같다. 그림에서와 같이 기초구조물과 기초파일 두부사이에 면진장치가 설치되고, 말뚝두부에 설치된 면진장치는 지진격리기능과 동시에 말뚝두부를 보호하고 보강하는 기능을 한다. 각 주요부재별 명칭과 기능은 아래와 같이 구분된다.

(가) 보호캡 - 말뚝두부 보강 및 지진격리장치 구속(상하부간 약 10mm정도 이격을 두어 설치)

(나) 보호재 - 탄성체(발포 우레탄)로 밀실하게 채움하여 1차 방수기능 함

(다) 방수쉬트 - 지하수 등으로부터 지진격리장치 보호

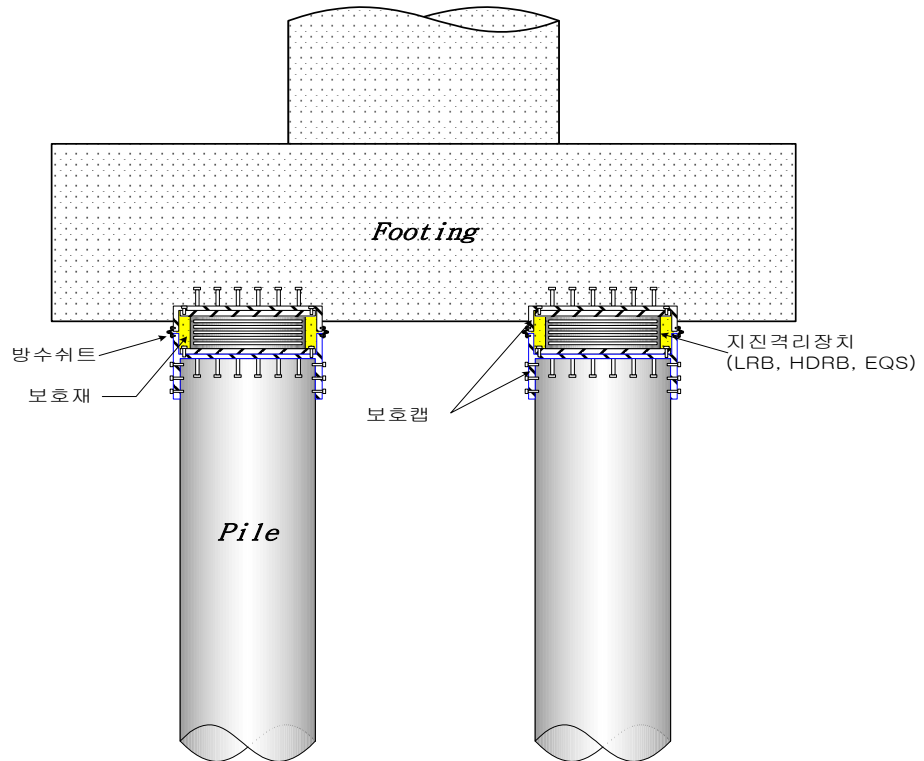


그림 69. 말뚝두부보강 면진댐퍼 시설의 일반개요도

(2) 시스템의 거동원리

말뚝두부보강 면진댐퍼시스템의 기본적인 거동원리는 그림 5.8과 같으며 일반 지진격리시스템과 유사하다. 기존의 교량에서의 지진격리시스템은 상부구조물과 교각사이에 지진격리장치를 설치함을 기본으로 한다. 그러나 본 연구에서 제안된 방안은 지중구조체인 말뚝파일의 파손을 방지함과 동시에 교량의 상하부 구조물의 안전을 꾀하기 위해 말뚝상부와 기초하면에 지진리장치를 설치한다.

본 연구에서 시험평가 분석 대상인 지진격리장치는 수직하중 1000kN 용량으로 설계하였으며, 이에 대한 개괄적인 설계의 일예는 그림 5.9와 같다. 기초파일의 직경은 $\phi 500\text{mm}$ 이고, 지진격리장치의 직경은 $\phi 400\text{mm}$ 이다. 그리고 지진격리장치외부에는 파일직경과 형상이 동일하게 보호캡을 설치하고, 지진격리장치의 장기 크리프 처짐량을 사전에 예측하고 이에 상응한 간격을 두어 지진격리장치의 거동시 변형이 원활하도록 한다. 또한 보호캡 내부에는 보호재를 채움으로서 지하수와 토사로부터의 이물질의 유입을 방지하고 이에 따른 환경적 열화를 최소화 한다. 보호캡 상부와 하부간의 이격공간에는 유연성이 좋고, 방수기능이 뛰어나 방수쉬트를 부착하여 보호캡 내부로의 오염물질의 유입을 1차적으로 방지하고 뛰어난 신축성으로 인하여 지진격리장치의 원활한 변위를 수용하도록 한다.

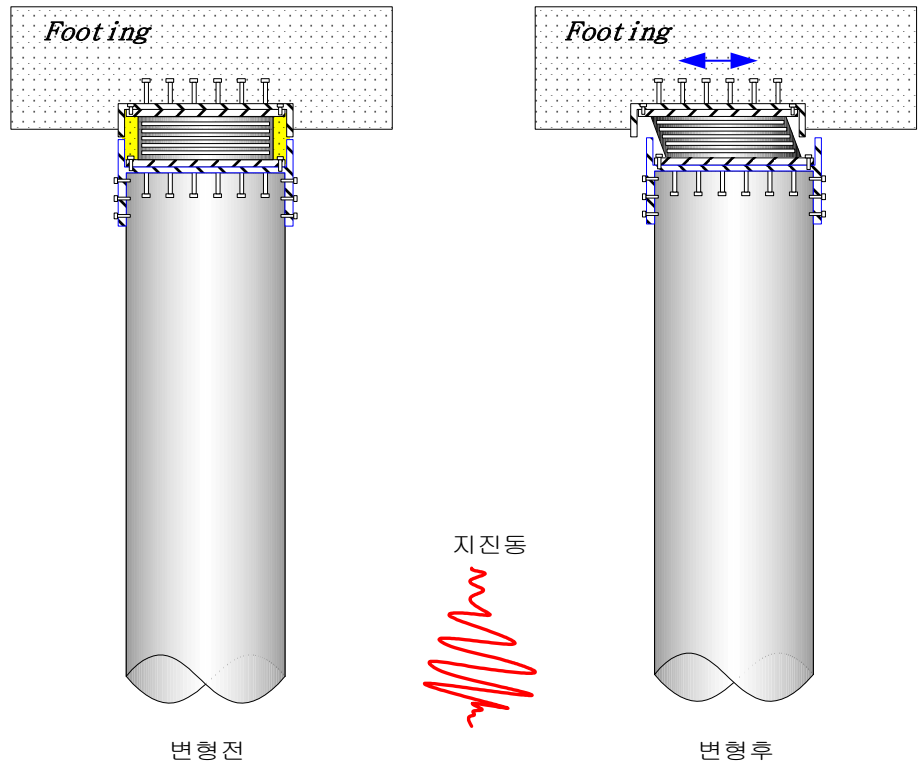


그림 70. 말뚝두부보강 면진댐퍼 작동원리

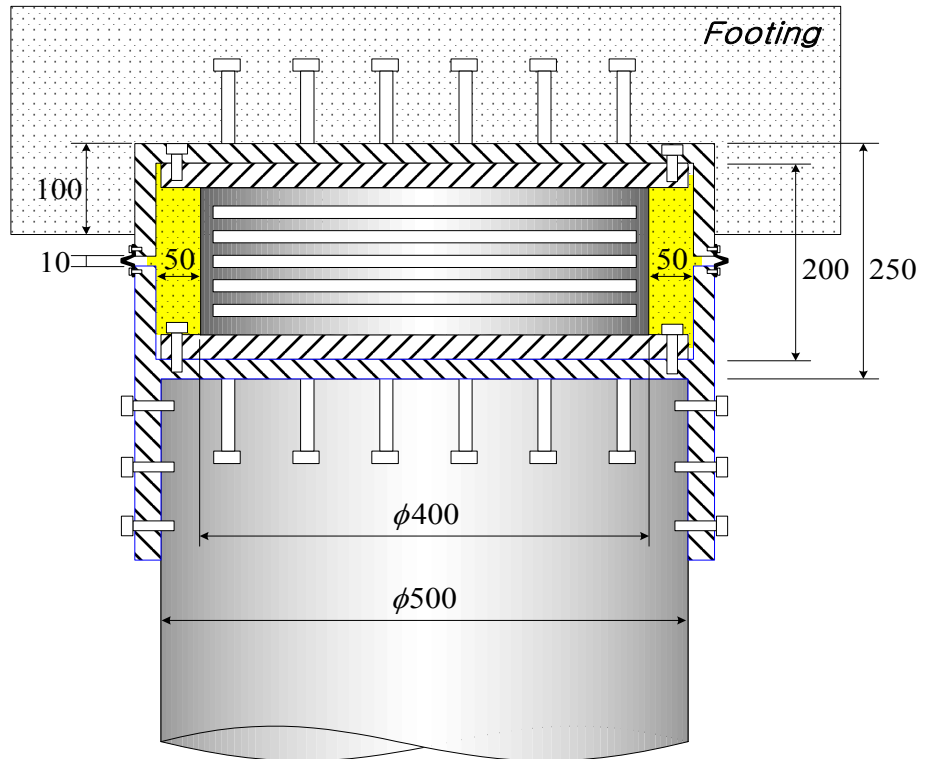


그림 71. 기초면진댐퍼 개략단면제원 (받침용량 : 1000kN)

(3) 말뚝두부보강 면진댐퍼 개념안

본 연구과제에서 제안한 말뚝두부보강 공법은 말뚝끝단 머리부와 기초와의 접합부분에 지진격리장치를 설치하여 지진시 구조물의 안전성을 향상시키고, 말뚝두부보강을 동시에 만족하도록 하는 개념이다. 본 연구에서 고려할 사항중 하나는 지진격리장치와 말뚝두부 그리고 기초와의 안정적인 정착방안이다. 이에 1차년도 연구에서는 교량에서의 지진격리장치 설치 시공법을 바탕으로 본 연구과제의 목적에 부합하도록 정착방안을 제안하였다.

말뚝두부와 지진격리장치 또는 지진격리장치와 기초부의 정착 방안에 대한 개념안은 그림 5.10과 같이 제안하였다. 그림 5.10에 제안된 개념안은 PHC말뚝과 강관말뚝에 동일하게 적용가능하다. 이 제안 개념안은 기존의 말뚝두부 보강방안을 참조하여 안전성을 꾀하였으며, 지진격리장치의 정착부에서의 전도모멘트와 수평력 등을 고려하였다. 말뚝두부보강 면진댐퍼의 주요부재에 대하여 개괄적으로 설명하면 다음과 같다.

지진격리장치는 수직하중 및 수평하중, 회전 모멘트 등을 고려하여 지진시 변형 후 복원기능 및 에너지 소산능력이 우수한 받침장치로 선정한다. 본 연구에서는 납 면진받침(LRB)와 고감쇠 고무받침(HDRB)와 같은 적층형 고무받침 계열의 지진격리장치를 추천한다. 정착앵커(set anchor) 및 스터드 볼트는 지진격리장치와 말뚝 그리고 기초부와의 완전한 부착을 위한 장치로서 부반력(uplift force)와 수평 전단력을 충분히 만족하도록 하여야한다. 강관거푸집은 말뚝내부에 철근을 배근하고 콘크리트를 타설할 경우 일정량의 콘크리트 채움을 만족시키기 위해서 강판을 설치한다. 채움 콘크리트는 기초부의 인반력을 충분히 받아줄 수 있을 정도의 깊이를 유지하도록 해야 하며, 지진격리장치 하부판과 정착앵커 등이 완전히 부착이 되도록 하여야 한다.

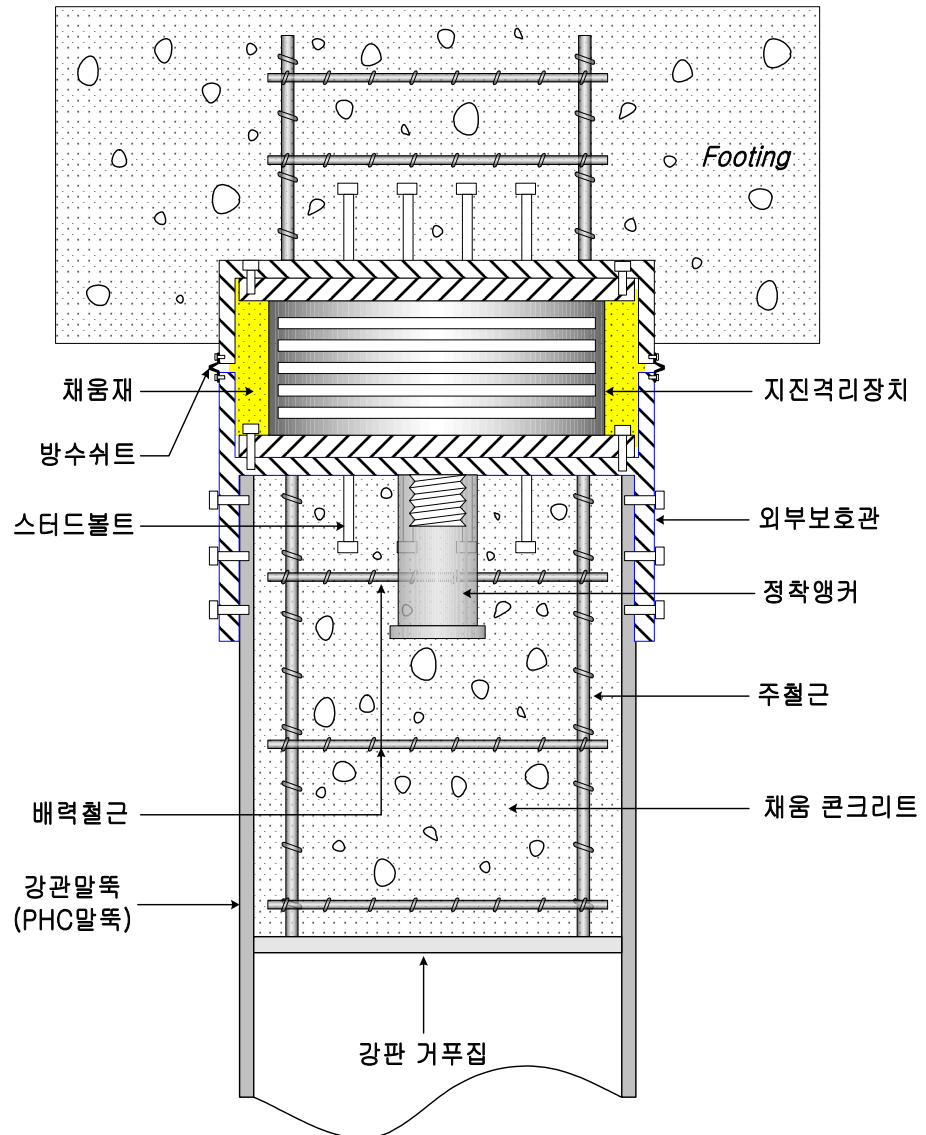


그림 72. 말뚝두부보강 댐퍼설치 개념안

외부 보호관은 지진격리장치 설치 후 지중에 매립되거나 별도의 유지관리 통로를 설치한다 할지라도 오염된 지하수나 토사 등의 부식 물질이 유입되어 지진격리장치를 열화시킬 우려가 있으므로 지진격리장치를 1차적으로 보호하기 위해 설치한다. 외부 보호관은 상부와 하부를 이격시켜 지진격리장치의 변형이 자연스럽게 하고, 지진격리장치의 장기 크리프 처짐량을 고려하여 이격을 둔다. 채움재는 지진격리장치와 외부 보호관사이에 발포우레탄과 같은 물질을 채워서 외부 보호관을 통해 유입된 오염물질로부터 지진격리장치를 보호한다. 마지막으로 방수 쉬트는 외부보호관 외부에 설치되며, 지진격리장치 거동 변형량 만큼 원활히 신축변형 가능하도록 한다. 이는 교량의 신축이음장치에서 배수구로 사용하는 고무 쉬트(rubber sheet)를 사용하며, 지진격리장치로 유입 가능한 수분(지하수 및 기타 오염물질)등의 유입을 원천적으로 차단하는 기능을 한다.

말뚝두부보강 면진댐퍼 설치순서는 아래와 같이 요약가능하다.

- ① 말뚝두부정리
- ② 강판거푸집과 철근배근부착(하부) 및 정착
- ③ 정착앵커 프리세팅
- ④ 채움 콘크리트 타설 및 양생
- ⑤ 지진격리장치 설치
- ⑥ 상하부 외부 보호관 설치 후 채움재(발포우레탄계) 채움
- ⑦ 방수쉬트 설치
- ⑧ 상부 철근배근 정착
- ⑨ 기초 콘크리트 타설

제7절 지진격리장치 특성실험

1. 지진격리장치

본 연구에서 선정된 지진격리장치는 일반 교량에서 안정성과 시공성에 잘 부합되며 상부구조의 반력지지와 온도변화에 따른 거동을 원활하게 수용 할 수 있는 기능성에 우선하여 경제적이고 안정적인 받침을 우선시 하여 다음과 같이 선정하였다.

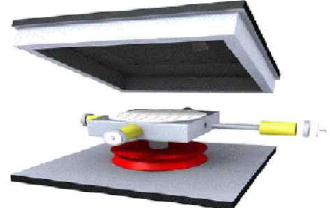
구 분		종 류	납 면진받침 (Lead Rubber Bearing)	고감쇠 고무받침 (High Damping Rubber Bearing)	면진형 디스크받침 (Energy Dissipate Systems)
구조적 형상					
주요사용 재료			·몸체 : 보강 탄성받침 ·면진 : 납심(Lead Core)	·몸체 : 고감쇠 고무와 강판 ·면진 : 고감쇠 고무소재	·몸체 : 폴리우레탄 디스크 ·면진 : 폴리우레탄계 스프링
제품특징			·설계 유연성 우수 ·명확한 메커니즘	·설계 유연성 우수 ·간단한 메커니즘	·설계 유연성 보통 ·복잡한 메커니즘
작 동 원 리	회전		·적층고무로 회전수용	·적층고무로 회전수용	·디스크받침으로 회전수용
	온도신축		·적층고무의 전단변형	·적층고무의 전단변형	·PTFE+PU 스프링의 압축변형
	풍하중		·납의 강성으로 저항	·고무의 강성으로 저항	·PTFE+PU 스프링의 압축강성
	지진시		·납의 비선형 거동	·고감쇠 고무의 비선형거동	·PTFE 마찰비선형 거동
사 용 성	상 시		·하중배분 효과 ·진동/소음 완충효과 있음	·하중배분 효과 ·진동/소음 완충효과 있음	·하중배분 효과 ·진동/소음 완충효과 없음
	지진시		·면진 및 하중배분 효과 ·복원력 우수 ·감쇠력 우수 ·상하방향 지진 대응성 우수	·면진 및 하중배분 효과 ·복원력 보통 ·감쇠력 우수 ·상하방향 지진 대응성 우수	·면진 및 하중배분 효과 ·복원력 보통 ·감쇠력 우수 ·상하방향 지진 대응성 결여
유지관리			·유지보수 불필요 ·회전에 대한 안전성 우수	·유지보수 불필요 ·회전에 대한 안전성 우수	·PTFE 교체 필요 ·회전에 대한 안전성 결여
내진해석			·내진해석의 정확성 보장 ·상판의 Z축 회전운동 억제 (낙교방지, 신축이음장치 안전)	·내진해석의 정확성 보장 ·상판의 Z축 회전운동 억제 (낙교방지, 신축이음장치 안전)	·마찰력에 대한 해석 부정확 ·상판의 Z축 회전운동 억제 (낙교방지, 신축이음장치 안전)

표 21. 지진격리장치 형식검토

본 연구에서 시험평가하기 위하여 선정한 지진격리장치는 국내외에서 기 개발 완료되어 그 적용 실적이 많고, 국산화 개발되어 경제성을 확보한 받침장치를 우선 고려 대상으로 하였다. 이와 같은 기준에 의해 1차 기초특성시험 대상으로 선정된 지진격리장치는 적층 고무계 받침과 강재받침으로 크게 구분된다.

적층 고무계 받침은 고무와 보강판이 여러 층으로 겹쳐진 형태로서 수직하중에 대하여 효과적으로 저항하고, 수평하중에 대해서는 변형이 용이한 형태의 받침이다. 적층고무계 받침으로는 납 면진받침(Lead Rubber Bearing)와 고감쇠 고무받침(High Damping Rubber Bearing), 천연고무받침(Natural Rubber Bearing)이 있다. 납 면진받침과 고감쇠 고무받침은 납과 같은 금속부재나 고무소재 자체에 감쇠기능을 가져 지진이나 풍하중이 작용시 효과적으로 에너지를 소산하는 기능을 가지고 있다. 그러나 천연고무받침은 에너지 소산기능이 다소 부족하여 지진격리장치의 범주를 벗어난다. 강제받침은 PTFE의 미끄럼 마찰기능과 폴리우레탄을 이용한 간격조절 기능을 조합한 형태의 받침장치로서 면진형 디스크받침(Energy Dissipate System)을 고려하였다. 상기의 표 3.1은 각 지진격리장치에 대하여 재료적 특성 및 거동원리, 사용성 등에 대하여 비교하여 정리한 것이다.

2. 기초 특성실험

본 연구에서 1차 선정된 지진격리장치의 시제품에 대하여 기초 특성치를 파악하기 위해 실시한 시험으로서 각 지진격리장치에 대하여 시제품을 제작하여 적합성 판정을 목적으로 시험을 실시하였다. 본 시험방법 및 평가기준은 아직까지 국내기준이 없어 ISO 2276(2005)에 준하여 시험을 실시하였으며, 시제품에 대한 특성 및 내구성능을 확인하였다.

가. 지진격리장치 설계 및 제작

(1) 적층형 고무받침

지진격리장치 시험체는 실제 교량기초파일의 설계압축력 및 변위에 의하여 결정되어지는 사용한계상태와 지진에 의한 극한한계상태 그리고 풍하중에 대한 저항 등에 대하여 만족하도록 설계하였다. 그리고 본 연구에서는 ISO 22762에 따라 시험체를 제작하였고, 특성실험을 수행하였다. 상기의 규격에서는 지진으로부터 교량 혹은 기타 구조물을 보호하고자 사용하는 적층고무받침 형태와 강제받침 형태의 지진격리장치에 대하여 시험방법과 설계기준, 제품검사 기준에 대하여 세부적으로 소개하고 있다. 상기의 설계조건과 시험평가기준에 따라 시험체를 제작하였으며, 시험체는 표 3.2와 같이 제작하였다.

항 목 시험체	강판지름 (mm)	구멍지름 (mm)	전체지름 (mm)	고무두께 (mm)	고무층수 (n)	강판두께 (mm)	S_1	S_2	전단탄성 계수(G)
LRB	280	60	300	2	20	2	27.5	7	0.4
HDRB	280	60	300	2	20	2	27.5	7	0.4
NRB	280	60	300	2	20	2	27.5	7	0.4

표 22. 적층고무받침 시험체 제원

$$\text{여기서, } S_1 \text{은 1차 형상계수} \left(= \frac{D_s - D_h}{4t_i} \right), S_2 \text{는 2차 형상계수} \left(= \frac{D_s}{nt_i} \right)$$

D_s 는 내부보강철판의 직경, D_h 는 내부 홀의 직경, t_i 는 고무 한층의 두께, n 은 고무층 수를 나타낸다.

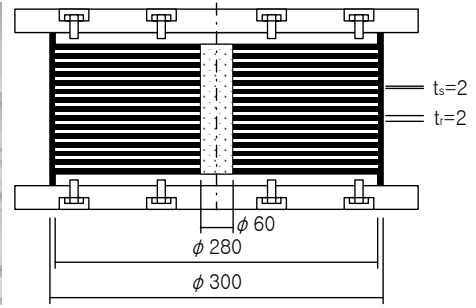


그림 73. 적층형 고무받침 시험체

그림 74. 시험체 단면제원(공통)

천연고무는 탁월한 탄성능력과 복원능력을 가지고 있어 지진격리받침에 폭넓게 이용되어 왔다. 본 연구에서 사용된 시험체 또한 천연고무의 고유성질에 고무자체의 탄성능력과 복원능력을 유지하고 에너지 흡수 능력을 증가시킨 고감쇠 고무(high damping rubber)와 납봉(Lead Core)을 사용하여 지진격리장치 시험체를 제작하였다. 시험체의 크기는 동일하고 주된 구성성분은 천연고무이다. 시험체의 직경은 외부고무 두께 10mm를 포함한 것으로 내부 적층고무 한 층의 두께는 각각 2mm이고, 고무의 적층수는 20층으로 적층하였다. 그리고 보강철판의 두께는 2mm이다. S_1 는 하나의 고무층 구멍을 포함한 자유 표면적에 대한 하중면적의 비로서 1차 형상계수이고, S_2 는 내부고무의 총 두께에 대한 유효폭의 비율을 나타내는 2차 형상계수이다. 그림 3.1과 그림 3.2는 시험체의 형상 및 제원을 나타낸 것이다. 일반적으로 고무재료 중에 카본블랙이 증가하면 고무의 가공성이 나빠지며 변형경화가 커지게 된다. 이처럼 고무재료의 구성성분에 따라서 그 성질 등이 변하게 된다. 전단특성 시험에 사용된 적층형 고무받침 시험체는 전단변형을 100%에서 전단탄성계수 G 값이 각각 0.4MPa 고무를 사용하여 고무받침을 제작하였으며, ISO 22762에서 제시하고 있는 표준시험체(standard test piece) 규격에 따라 원형타입으로 제작하였다.

(2) 면진형 디스크받침

고압축 및 고탄성 폴리우레탄 디스크를 이용한 면진형 디스크받침(EQS)은 교량상부와 하부구조물 사이에서 상호기초분리(base isolation)가 원활히 이루어 질수 있도록 특수 설계된 디스크받침(disk bearing)과 상시 및 지진시 작용되는 수평하중을 적당한 압축변형에 의한 강성으로 저항하여 구조적 안전성을 확보하는 매스에너지 조절장치(mass energy regular, MER)가 서로 조합되어 대부분의 지진력을 흡수소산 시키는 면진장치이다. 면진형 디스크받침 시험체의 설계 및 제작은 AASHTO(2007)과 도로교표준시방서(2005)에 근거하여 제작하였으며, 시험체의 형상은 그림 3.4와 같고 단면제원은 그림 3.4와 같다.

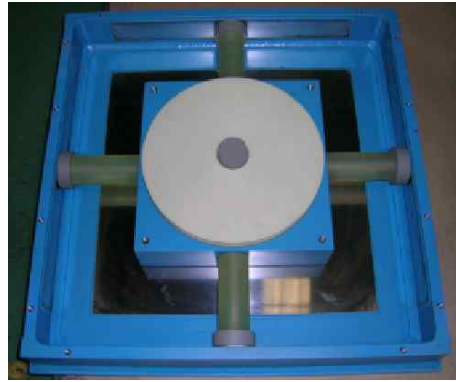


그림 75. 면진형 디스크 받침

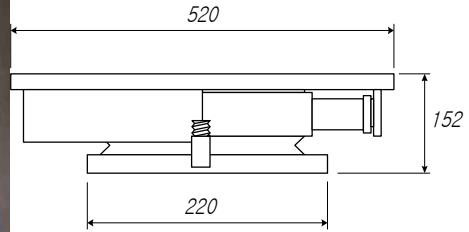


그림 76. 면진형 디스크 받침 제원

나. 실험장비

지진격리받침 시험체의 특성실험에 사용된 시험기는 표 3.3 및 그림 3.5에 나타난 바와 같이 압축-전단 피로시험기를 이용하여 시험하였다. 이 피로시험기는 최대수직하중은 2,000kN이며, 최대 수평하중은 500kN이다. 그리고 최대수평속도는 300mm/sec이고 수평방향 최대변위는 ± 200 mm이다.



그림 77. 2,000kN 압축-전단시험기

	최대하중	최대변위	최대속도
수직용량	± 2000 kN	± 100 mm	100mm/sec
수평용량	± 500 kN	± 200 mm	250mm/sec

표 23. 2,000kN 압축-전단 시험기 제원표

다. 실험항목

(1) 적층형 고무받침

전단특성시험은 제품의 특성치를 파악하기 위해 진행되는 시험으로서, 지진격리받침 설계시 가장 기본이 되는 압축강성, 전단강성 그리고 감쇠비 등의 특성을 파악하고자 전단특성실험을 수행하였다. 이렇게 전단특성 실험을 통해 얻은 제품의 기본 특성치를 ISO 22762의 설계식에 따라 계산한 설계값과 비교하여 오차범위를 만족하는지 확인하였다.

본 연구에서는 여러 종류의 지진격리받침 시험체를 제작하고, 다양한 의존성 실험을 수행하였다. 본 실험에서는 전단특성의 전단변형을 의존성, 압축응력 의존성, 주파수 의존성, 온도 의존성, 반복하중 의존성시험 등 총 5가지 항목에 대하여 실험을 수행하였다. 그림 3.6은 지진격리장치 중 적층형 고무받침에 대한 전단특성실험시 거동형태를 보인 것이다.



그림 78. 전단특성 실험

지진격리받침의 등가전단강성(K_h)과 등가감쇠비(h_{eq})를 얻기 위하여 전단특성 실험은 그림 3.7과 같이 수행하였다. 실험은 상온상태에서 설계면압이 유지되도록 수직하중을 일정하게 재하한 상태에서 0.5Hz의 정현파로 전체 고무두께를 설계전단변위로 산정하여 횡변위가 발생하도록 하는 방법으로 시험체에 총 11회 연속적으로 반복하여 2번째부터 11번째 이력곡선 각각을 평균하여 계산 하였다.

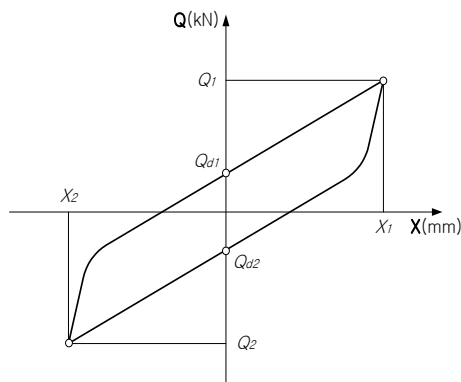


그림 79. 압축-전단하중 재하곡선

i 번째 사이클에서의 등가전단강성은 식 (1)을 이용하여 계산하였다. 여기서 Q_1^i, Q_2^i 는 i 번째 사이클에서의 최대, 최소 전단력이며, X_1^i, X_2^i 는 i 번째 사이클에서의 최대, 최소 변위이다.

$$K_h^i = \frac{Q_1^i - Q_2^i}{X_1^i - X_2^i} \quad (1)$$

i 번째 사이클에서의 등가감쇠비 h_{eq}^i 는 식 (2)를 이용하여 계산하였다. 여기서, ΔW^i 는 i 번째 사이클의 이력곡선에 의해 둘러싸인 면적이다.

$$h_{eq}^i = \frac{2 \cdot \Delta W^i}{\pi \cdot K_h^i (X_1^i - X_2^i)^2} \quad (2)$$

본 연구에서는 전단강성과 등가감쇠비를 결정하기 위해 식 (3), (4)처럼 2회부터 11회까지의 평균값을 이용하여 고감쇠 고무받침의 전단강성과 등가감쇠비를 계산하였다.

$$K_h = \frac{1}{10} \sum_{i=2}^{11} K_h^i \quad (3)$$

$$h_{eq} = \frac{1}{10} \sum_{i=2}^{11} h_{eq}^i \quad (4)$$

한편 등가전단강성의 설계값과 식 (5)를 이용하여 계산하였지만, 등가감쇠비의 설계식은 기준에 주어져 있지 않았기 때문에 여기서는 등가전단강성에 대해서만 설계값과 비교하였다.

$$K_h = \frac{G \cdot A}{T_r} \quad (5)$$

3. 특성실험 및 결과

지진격리받침의 특성파악을 위하여 상기의 절에서 설명한 바와 같이 다양한 실험항목에 대하여 장시간에 걸쳐 실험을 수행하였다. 고온과 저온실험을 제외한 실험온도는 +23℃이며 각 실험항목에 대한 실험방법 및 결과는 다음과 같다.

가. 면진형 디스크받침

폴리우레탄을 이용한 교량받침장치에 대한 특성 및 성능평가에 대한 시험방법 및 평가기준은 아직까지 국내외에 정립되어있지 않고 있는 실정이다. 국외 설계기준(AASHTO, 2007)의 경우에는 내진형 디스크받침에 대한 폴리우레탄 소재 및 설계기준, 특성시험 및 평가기준에 대해서 명기되어져 있다. 그러나 면진형 디스크받침에 설계 및 제작에 대한 언급이 없어, 제작업체의 특별기준에 준하여 시험평가하고 있는 실정이다. 국내의 경우도 국외의 경우와 별반차이가 없는 실정이다. 단지 도로교표준시방서(2005)에 국외의 경우와 같이 내진형 디스크받침에 대해서만 명기되어져 있다.

이에 따라 본 연구에서는 면진형 디스크받침에 대한 특성 및 성능평가를 위하여 AASHTO Guide Spec.(1999)과 ISO 22762(2005)에 준하여 일반적인 지진격리장치에 대한 시험기준을 적용하여 시험을 실시하였다. 본 시험에서도 적층형 고무받침 시험체와 마찬가지로 각종 의존성실험을 실시하였으며, 각종 의존성 시험은 상기의 3.3절과 동일한 방법으로 실시하였다. 의존성 실험결과는 3.4.1절에 다른 지진격리장치와 성능비교 하여 나타냈으며, 그 외의 시험방법은 본 절에서 설명하기로 한다.

(1) 시험방법

(가) 최대 수직하중시험

본 시험방법은 AASHTO(2007)에 따른 시험을 바탕으로 변형된 시험기법으로 예비시험과 본 시험으로 구분되면 최종 시험결과는 본 시험 결과를 토대로 평가 실시한다. 시험 방법은 아래와 같은 순서로 실시한다.

- ① 최소 수직하중을 재하하고 변위계 0점을 잡는다.
- ② 최대 수직하중까지 15kN/sec의 속도로 가압하고 최대 수직하중까지 10분 유지한다.
- ③ 하중을 최소 하중까지 제거하고 10분유지 후 다시 최대 수직하중까지 재하 하여 10분을 유지한다.
- ④ 다시 하중을 최소하중까지 제거하고 10분을 유지한다.
- ⑤ 최대 수직 처짐량과 잔류변위량을 기록한다.

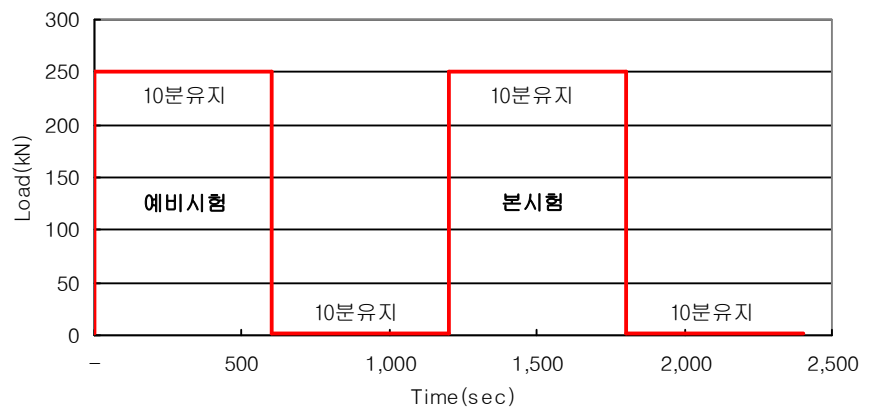


그림 80. 디스크 최대수직하중시험



그림 81. 디스크 받침 시험전경

(나) 최대 수직하중의 150%하중과 설계회전 시험

본 시험방법은 도로교표준시방서(2005)에 따른 시험법으로 수직하중과 허용회전량을 모두 고려한 시험으로 예비구간과 본시험구간으로 구분되면 최종 시험결과는 본 시험 결과를 토대로 평가 실시한다. 시험 방법은 아래와 같은 순서로 실시한다.

- ① 최대 하중의 150%에 해당하는 수직하중과 설계회전용량(0.02rad) 경사판을 설치한다.
- ② 최대 하중의 150%에 해당하는 수직하중을 재하 후 10분간 유지한다.
- ③ 수직 하중을 제거 후 10분간 유지한다.
- ④ 최대 하중의 150%에 해당하는 하중을 5등분하여 각 등분에서 2분씩 유지하면서 하중을 증가시킨다.
- ⑤ 최대 하중의 150%에 해당하는 하중을 60분간 유지 후 (3)의 역순으로 하중을 제거한다.
- ⑥ 하중제거 후 10분간 유지한다.
- ⑦ 최대 수직 처짐량과 잔류변위량을 기록한다.

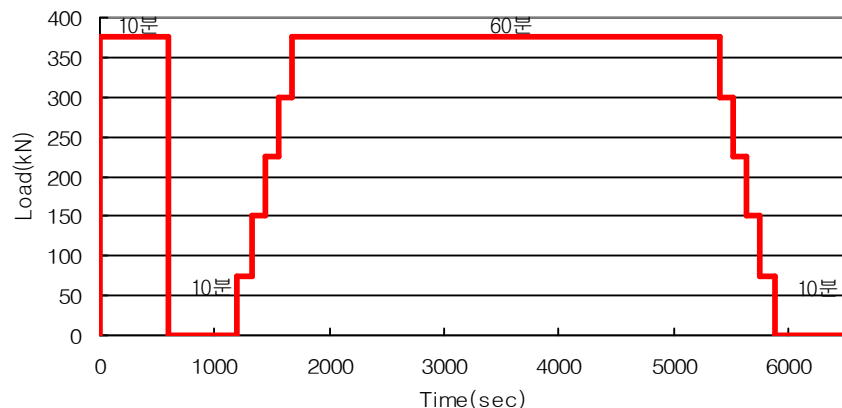


그림 82. 최대수직하중의 150%하중 및 설계회전시험

(2) 성능시험 평가기준 및 규정

(가) 도로교 표준시방서 (2005)

① 성능시험

시험용 받침은 1시간동안 설계용량의 150%까지 하중과 0.02rad의 회전과 설계회전용량 중에서 큰 회전을 함께 가해서 실시한다.

② 시험 후 검사기준

- a. 받침은 시험동안 그리고 시험 후에 분해하여 육안으로 검사해야한다.
- b. 돌출되거나 변형된 폴리에테르 우레탄 또는 PTFE, 또는 균열이 발생한 강재등과 같이 육안으로 관찰되는 결함은 불합격 원인이 된다.

- c. 시험하는 동안에 폴리에테르 우레탄 요소와 받침판 사이에서 그리고 상부 미끄럼 강판과 상부 받침판 사이에서 연속적이고 균일한 접촉이 유지되어야 한다. 들뜬 것이 발견되면 이것은 해당 로트의 불합격 요인이 된다.

(나) AASHTO LRFD Bridge Design Specification (2004)

Its instantaneous deflection under total load does not exceed 10 percent of the thickness of the unstressed disc, and the additional deflection due to creep does not exceed 8 percent of the thickness of the unstressed disc;

【해설】 총 하중에 의한 초기 처짐은 무 응력상태의 디스크 두께의 10%를 넘지 않고, 크리프에 의한 추가 처짐은 무 응력상태의 디스크 두께의 8%를 넘지 않아야 한다.

The component of the bearing do not lift off each other at any location; and

【해설】 받침의 부재들은 어느 위치에서도 부상되지 않아야 한다.

The average compressive stress on the disc does not exceed 35MPa. If the outer surface of the disc is not vertical, the stress shall be computed using the smallest plan area of the disc.

【해설】 디스크의 평균압축응력은 35MPa를 넘지 않아야 한다. 만약 디스크의 외부면이 수직이 아닌 경우 응력은 디스크의 가장 작은 평면적을 사용하여 구한다.

(3) 시험결과

(가) 최대수직하중시험

본 시험은 AASHTO LRFD(2007)에 따른 시험을 바탕으로 변형된 시험기법으로 예비시험과 본 시험으로 구분되면 최종 시험결과는 본 시험 결과를 토대로 평가 실시한다.

구 분	예비 시험구간		본 시험구간		허 용 기준치 (mm)	시험 후 Disk상태
하중재하조건	1000kN	100kN	1000kN	100kN		
시험결과	max	min	max	min		
변형량(mm)	3.14	0.32	3.20	0.40	3.5	상태양호

표 24. 최대수직하중시험

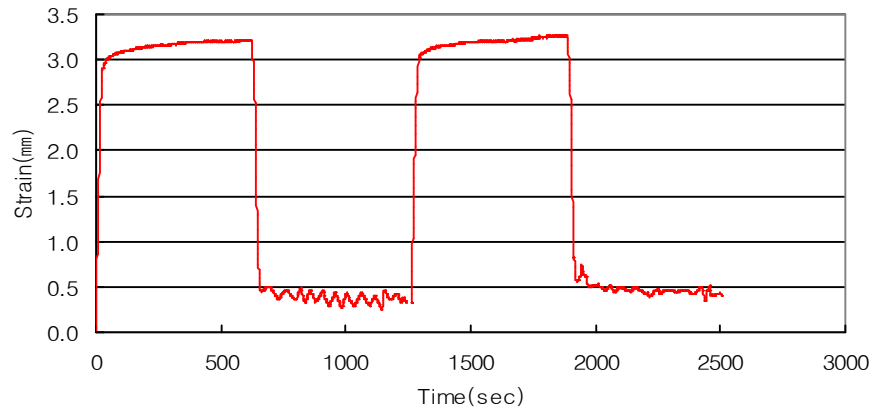


그림 83. 시간-변위 곡선(1000kN)

설계하중 1000kN인 폴리우레탄 디스크에 대한 최대수직하중 시험결과 표 3.4와 그림 3.23과 같은 결과를 얻었다. AASHTO LRFD(2007)의 시험방법과 평가기준이 따른 시험법으로서 허용기준치 3.5mm 이내로 처짐이 발생함으로서 성능기준을 만족하는 것으로 판단된다.

(나) 최대수직하중의 150%재하 및 허용회전각 시험

본 시험법은 도로교표준시방서를 기준한 시험법으로 시험용 받침은 1시간동안 설계용량의 150%까지 하중과 0.02rad의 회전과 설계회전용량 중에서 큰 회전을 함께 가해서 실시한다.

구 분	예비 시험구간		본 시험구간			시험 후 Disk상태
하중재하조건	6750kN	100kN	6750kN	6750kN	100kN	
시험결과	max	min	max	Creep	min	
변형량(mm)	4.623	0.979	4.521	4.718	1.065	

표 25. 최대수직하중의 150%재하 및 허용회전각 시험

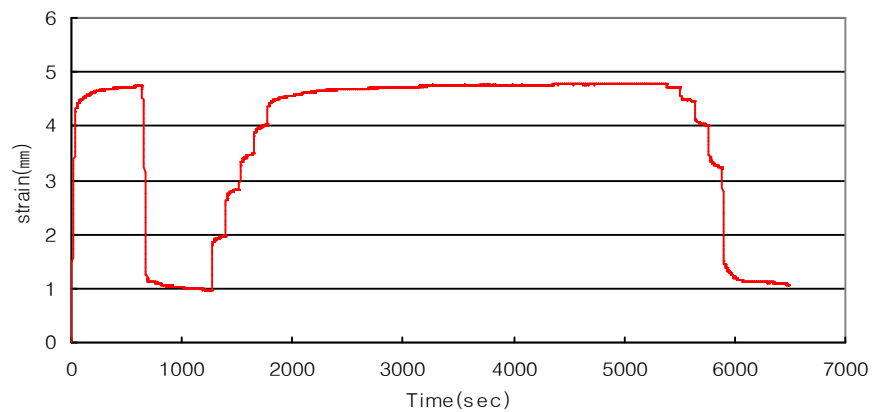


그림 84. 시간-변위 곡선(1500kN)

폴리우레탄 디스크에 설계하중의 150%인 1500kN의 하중을 수직 재하하고 동시에 회전각(0.02rad)만큼 추가 하중을 주어 시험한 결과 표 3.5와 그림 3.24와 같은 결과를 얻었다. 이 시험은 정성적 평가로서 시험 전과 시험 후에 폴리우레탄 디스크의 외관상태를 육안점검 하는 것으로서 시험 전후 폴리우레탄 디스크의 육안 조사결과 결함이라 할 수 있는 균열이나 찢어짐 등의 변상이 발생하지 않아 성능기준을 만족하는 것으로 판단된다.

제4장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

제1절 1차년도 달성도

목 표		50%↘	100%↘	달성도
수치해석	RC 박스 및 교량, 건축물 힌지거동 연구			100%
	전단스프링 연구 (고무계열, 강재계열)			100%
	타당성(경제성) 및 적합성			100%
실험수행	지하구조물 힌지 거동 구조계산			100%
	탄성고무받침 특성 실험			100%
	EDS 받침 특성 실험			100%
강관말뚝,PHC말뚝 정착방안				100%

제2절 향후 연구계획

1. 향후 주요 연구수행 계획

구 분	주관연구기관 (주요 연구수행 계획)	공동연구기관 (주요 연구수행 계획)
연구계획 2010~2011 (16개월)	말뚝 재질별 적용성 연구 SCI(E)급 논문 게재 특허 등록	국내외 설계, 성능평가 기준조사 면진장치 설계 및 FEM 해석 특성 및 성능시험 기법 및 평가기준 정립

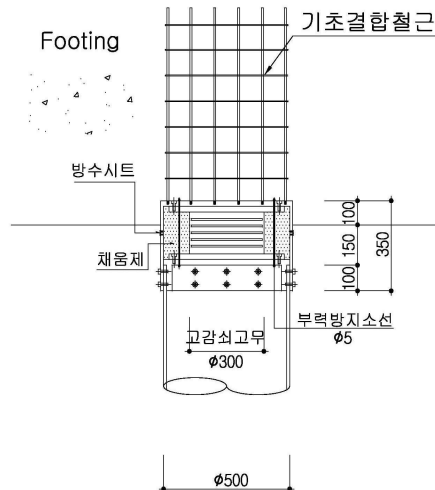
2. 향후 주요 연구수행 계획

세부 연구분야	월단위 추진계획															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
말뚝 재질별 적용성 연구																
유지관리성 연구																
내구성 구조개발 연구																
면진말뚝두부설치 전체계영향연구																
SCI(E)급 논문 게재																
특허등록																
면진댐퍼 설계 및 해석																
시제품 설계 및 제작																
특성 및 성능시험																
환경열화 방지설계																
종합보고서 작성																

제5장 연구개발결과의 활용방안

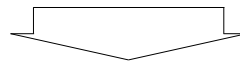
제1절 연구개발결과의 활용방안

1. 모듈화된 제품으로 인한 시공성 간편



2. 활용계획

시공성 : 모듈화된 면진장치로 시공성 우수
경제성 : 지진 하중에 대한 지진 응답력 감소로 경제성 우수
유지관리성 : 지진에 대한 기초의 유지관리 방안 제시로 유지관리성 우수
미래원천 기술확보 : 신개념의 지진력 제어 기술로 원천 기술력 확보



실용화 및 사업화 가능성 존재

제6장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

해당사항 없음

제7장 참고문헌

1. 도로교설계기준, 건설교통부, 2005
2. 도덕현, 고재만, “실무 내진공학”, 도서출판 건설정보사, 2004
3. 한국철강협회 강구조센터, 강관말뚝 가이드북, 2005
4. David Dowrick, "Earthquake Resistant Design and Risk Reduction", John Wiley & Sons, 2009, pp.316~325
5. AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, AASHTO, 2004
6. ISO 22762, Elastomeric Seismic Protection Isolators, Part-1 : Test Methods, 2005
7. ISO 22762, Elastomeric Seismic Protection Isolators Part-2 : Applications for bridge-specifications, 2005
8. 정길영, 하동호, 박건록, 김두훈, “ 저경도 납면진받침의 특성에 관한 실험적 연구”, 대한 토목학회논문집, 제22권, 제6A호, pp1295~1307, 2002

주 의

1. 이 보고서는 국토해양부에서 시행한 건설기술혁신 사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토해양부에서 시행한 건설기술혁신 사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니 됩니다.