

적층고무받침을 사용한 철근콘크리트 교각의 내진성능평가

Seismic Performance Evaluation of Reinforced Concrete Bridge Piers Supported by Laminated Rubber Bearings

김 태 훈* 최 정 호** 신 현 목***
Kim, Tae Hoon Choi, Jung Ho Shin, Hyun Mock

국문요약

이 연구는 적층고무받침을 사용한 철근콘크리트 교각의 내진성능평가를 하는데 그 목적이 있다. 사용된 프로그램은 철근콘크리트 구조물의 해석을 위한 RCAHEST이다. 재료적 비선형성에 대해서는 균열콘크리트에 대한 인장, 압축, 전단모델과 콘크리트 속에 있는 철근모델을 조합하여 고려하였다. 이에 대한 콘크리트의 균열모델로서는 분산균열모델을 사용하였으며 적층고무받침의 거동을 예측하기 위해서 지진격리요소를 개발하였다. 이 연구에서는 적층고무받침을 사용한 철근콘크리트 교각의 내진성능평가를 위해 제안한 해석기법을 신뢰성 있는 연구자의 실험결과와 비교하여 그 타당성을 검증하였다.

주요어 : 적층고무받침, 철근콘크리트 교각, 내진성능, 지진격리요소

ABSTRACT

The purpose of this study is to evaluate seismic performance of reinforced concrete bridge piers supported by laminated rubber bearings. A computer program, named RCAHEST(Reinforced Concrete Analysis in Higher Evaluation System Technology), for the analysis of reinforced concrete structures was used. Material nonlinearity is taken into account by comprising tensile, compressive and shear models of cracked concrete and a model of reinforcing steel. The smeared crack approach is incorporated. Seismic isolator element is developed to predict behaviors of laminated rubber bearings. The proposed numerical method for seismic performance evaluation of reinforced concrete bridge piers supported by laminated rubber bearings is verified by comparison with reliable experimental results.

Key words : laminated rubber bearings, reinforced concrete bridge piers, seismic performance, seismic isolator element

1. 서 론

근래에 세계 각국에서 발생한 지진들, 즉 Loma Prieta 지진(1989), Northridge 지진(1994), Kobe 지진(1995), 그리고 대만지진(1999) 등으로 인하여 빌딩 및 교량과 같은 사회기반시설물의 피해가 잇따르고 있다. 그 중에서도 교량 구조물의 손상 및 붕괴는 현대사회에서 치명적인 손실로 이어질 수 있다. 따라서 현존하는 교량 구조물의 내진성능을 정확히 평가하는 연구와 그에 따른 내진성능 향상에 대한 연구가 우선적으로 시급한 과제이다.

내진성능을 확보하는 방법으로는 크게 지진하중에 적절히 대항할 수 있도록 주요부재나 구조세목을 설계하는 내진설계 개념과 지진격리장치 및 감쇠장치를 이용하여 지진하중을 피하거나 소산시킴으로써 구조물의 내진성능을 높이는 면진설계 개념으로 나눌 수 있다.

최근 지진이 일어났을 때 지진격리장치를 이용하여 구조물의 손상을 줄이는 설계방법에 대해서 많은 연구가 이루어지고 있다. 현재 지진격리시스템은 미국, 일본, 뉴질랜드, 이탈리아 등에서 신설되는 구조물이나 현존하는 교량, 빌딩, 기타

산업용 구조물의 보수 및 보강에 사용되고 있다. 특히 지진격리장치 중에서 적층고무받침은 미국이나 일본 등에서 널리 사용되고 있으며, 다른 국가들에서도 적층고무받침의 사용이 증가하는 추세에 있다.⁽¹⁾⁻⁽³⁾

지진격리장치는 크게 탄성받침(elastomeric bearings)과 활동형받침(sliding bearings)으로 구분된다. 탄성받침은 주로 고무의 전단강성과 감쇠를 이용하는 적층고무형이며 활동형받침은 PTFE(Poly-Tetra-Fluor-Ethylene)와 스테인리스 판 사이의 마찰을 이용하고 별도의 복원장치를 설치하는 형태를 가지고 있다.⁽⁴⁾

지진하중에 의해 구조물의 진동이 일어날 경우에는 구조물에 발생하는 관성력에 의해서 매우 큰 전단력이 구조물의 기초부에 전달될 수 있다. 따라서 지진에 의해서 발생하는 구조물의 피해는 상부구조물의 진동전달을 감소시킴으로써 최소화 할 수 있다. 강한 지진이 발생할 경우 지진격리장치는 수직방향의 지반운동에 대해서는 강체로서 거동하면서 수평성분으로부터는 구조물을 격리시키는 역할을 하게 된다. 이러한 지진격리시스템은 다른 방법에 비하여 경제성 및 효율성이 우수하기 때문에 이에 대한 설계방법과 내진성능에 대한 실험적인 연구가 많이 수행되어 왔다.⁽⁵⁾⁻⁽⁷⁾

이 연구는 적층고무받침을 사용한 철근콘크리트 교각의 비선형 이력거동을 해석적으로 예측할 수 있는 기법을 제시하는데 그 목적이 있다. 철근콘크리트 부재의 거동은 콘크리트의 균열, 철근의 항복, 철근과 콘크리트의 부착작용 및 균

* 정희원 · 성균관대학교 건축·조경 및 토목공학 연구소 선임연구원, 공학박사
(대표저자: meopilot@skku.edu)
** 정희원 · 한경대학교 토목공학과 조교수, 공학박사
*** 정희원 · 성균관대학교 토목환경공학과 교수, 공학박사
본 논문에 대한 토의를 2004년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.
(논문접수일 : 2004. 2. 19 / 심사종료일 : 2004. 4. 3)

열 면에서의 전단전달효과 등과 같은 재료적인 특성에 크게 지배되기 때문에, 이를 해석적으로 예측하기 위해서는 각각의 재료적인 특성을 정확하고 신뢰성 있게 표현할 수 있는 재료모델의 구축이 선행되어야 한다. 따라서 이 연구에서는 2축 응력 상태에 대한 직교 이방성 재료모델에 의해서 균열이 발생한 철근콘크리트 요소의 거동특성을 표현하고, 이를 유한요소법을 사용하여 확장한 기존의 검증된 프로그램⁽⁶⁾에 적층고무받침의 거동특성을 적절히 표현할 수 있는 지진격리요소(seismic isolator element)를 추가하여 적층고무받침을 사용한 철근콘크리트 교각의 비선형 이력거동을 예측하고자 한다.

2. 철근콘크리트의 비선형 재료모델

2.1 이차원 응력 하에서의 철근콘크리트의 비선형 재료모델

철근콘크리트의 비선형 재료모델은 저자 등에 의하여 이미 발표된 재료모델^{(9),(10)}을 그대로 적용하기로 한다. 사용된 비선형 재료모델의 특징을 간단히 요약하면 다음과 같다.

균열발생후의 비선형성은 현저하게 나타나며, 이러한 재료적 비선형성에 대해서는 철근콘크리트 요소의 직교 이방성의 가정에 따라, 균열직각방향으로 콘크리트가 부담하게 되는 인장응력을 고려하기 위한 인장강성모델과 균열방향으로의 압축강성 저하를 고려하기 위한 압축강성모델 및 균열면에서의 전단전달효과를 고려하기 위한 전단전달모델을 각각 적용한다.

균열이 분산하여 분포된 철근콘크리트 부재의 변형거동은 사용된 균열개념에 크게 영향을 받는다. 이 연구에서는 제 2 균열의 발생을 제 1 균열과 직교방향으로 발생하도록 제한하여 콘크리트의 강성이 과대평가 되는 직교 고정균열모델과 달리, 실제 주응력의 방향과 직각으로 발생하도록 한 비직교 고정균열모델을 적용함으로써 콘크리트의 강성을 보다 사실적으로 평가하였다.

콘크리트 속의 철근에 대한 항복후 거동은 철근만의 특성과 함께 부작효과 등이 동시에 고려되어야 한다. 콘크리트 속의 철근응력은 일정하지 않고 균열면에서 최대가 된다. 철근의 응력-변형률 관계가 탄성영역에 있는 경우에는 철근만의 구성모델을 적용하면 된다. 그러나 균열면에서 철근이 최초로 항복하게 되면 철근의 평균응력-평균변형률 관계는 더 이상 탄성관계가 성립하지 않는다. 균열부분을 제외하면 철근은 아직 항복을 하지 않았으므로 증가된 변형률에 따라 응력이 증가하게 된다. 즉 균열부분은 철근의 항복으로 인해 응력의 증가가 없지만 내부의 철근의 응력은 증가하여 철근의 평균응력이 증가하게 되므로 철근만의 응력-변형률 관계에서 볼 수 있는 항복고원현상은 나타나지 않는다. 이 연구에서는 포락선부분에 대한 철근의 항복후 거동을 저자 등이 제안한 trilinear 모델로써 표현하였다.

압축파괴가 발생한 콘크리트의 역학적 특성은 이미 여러 연구자들에 의해서 규명된 바가 있다. 이 연구에서는 콘크리

트 압축파괴 이후의 효과를 Kent 등에 의해 제안된 해석모델⁽¹¹⁾을 수정하여 고려하였다. 또한, 압축파괴가 발생한 콘크리트의 안에 있는 철근의 좌굴거동은 최종적인 내력저하의 원인이 된다. 철근을 둘러싸고 있는 콘크리트에 압축파괴가 발생하면 철근이 좌굴을 하였다고 판단하였으며 좌굴 시의 철근의 응력은 압축파괴가 발생한 콘크리트에서와 같이 좌굴을 무시하고 구한 철근 응력의 20%를 취하였다.⁽¹²⁾

지진하중과 같은 반복하중을 받는 철근콘크리트 교각의 비선형 이력거동 특성을 올바르게 평가하기 위해서는 하중재하 회수에 의한 피로거동을 무시할 수 없으며 이에 대한 충분한 고려가 필요하다. 이 연구에서는 철근과 콘크리트의 해석모델에 하중재하 회수의 누적에 따른 강도 및 강성 저하의 영향을 적용함으로써 피로손상을 고려하였다. 철근의 피로모델은 Coffin-Manson의 제안식⁽¹³⁾을 적용하였으며 콘크리트의 피로모델은 Kakuta 등의 제안식⁽¹⁴⁾을 수정하여 제안하였다.

2.2 적층고무받침의 재료모델

적층고무받침은 유연한 휨강성을 가지도록 방진고무를 주재료로 하며 수직강성을 보강하기 위해 강판을 삽입한 것을 기본 형식으로 하고 있다. 적층고무받침은 하중을 효과적으로 전달할 수 있으며, 전단변형에 의한 이동, 탄성변형에 의한 회전 등 모든 방향으로의 신축 및 회전이 가능하기 때문에 그 적용이 다양하며 형상, 단면, 평면형태, 개수 등은 연직하중과 수평변위에 의해 결정된다.⁽¹⁾

Fig. 1과 Fig. 2는 적층고무받침의 형상과 역학적 해석모델을 각각 나타낸다. 일반적으로 수치해석과정에서 지진격리장치의 비선형성은 등가선형모델이나 bilinear 모델 등에 의해서 정의된다.⁽¹⁵⁾

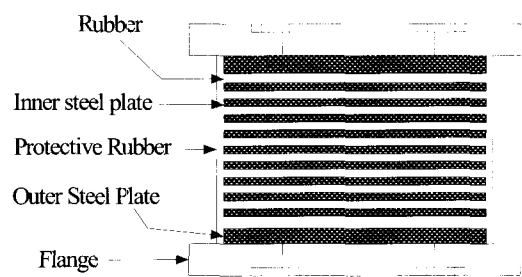


Fig. 1 Laminated rubber bearing

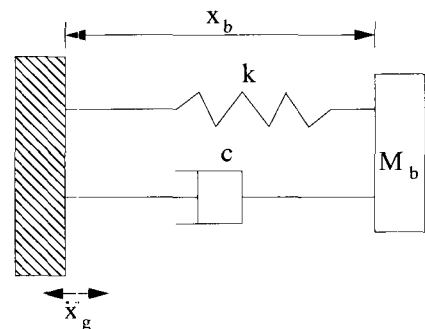
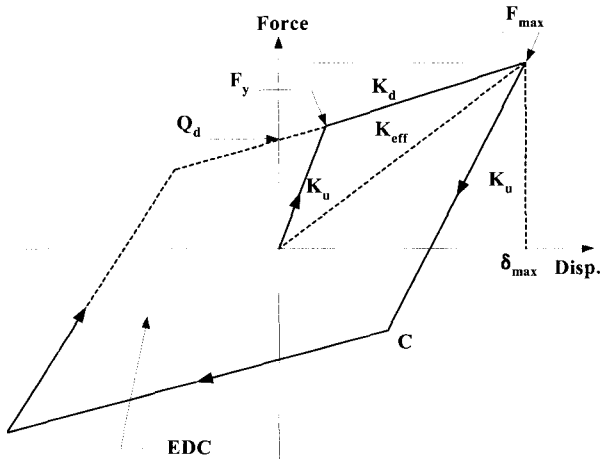


Fig. 2 Idealized model for laminated rubber bearing

이 연구에서는 적층고무받침을 사용한 철근콘크리트 교각의 거동을 예측하기 위하여 Fig. 3과 같은 탄소성 bilinear 모델을 사용하여 지진격리장치의 특성을 고려하였다. 실질적으로 대부분의 지진격리장치는 Fig. 3의 세 가지 매개변수인 K_u , K_d , 그리고 Q_d 에 기초를 두고 bilinear 모델로 이상화된다.⁽¹⁶⁾



Q_d : Characteristic strength, F_y : Yield force,
 F_{max} : Maximum force, K_d : Post-yield stiffness,
 K_{eff} : Effective stiffness, K_u : Elastic stiffness,
 δ_{max} : Maximum bearing displacement,
 EDC : Area of hysteresis loop

Fig. 3 Hysteresis loop of bilinear model

3. 유한요소 정식화 및 비선형 유한요소해석 프로그램

3.1 지진격리요소

이 연구에서는 유한요소 정식화가 간편한 3차원 spring 요소⁽¹⁷⁾를 사용하여 적층고무받침 등의 비선형 거동특성을 고려할 수 있는 지진격리요소를 개발하였다. 지진격리요소는 국부좌표계의 x, y, z 방향 및 회전방향의 강성을 할당할 수 있으며 전체좌표계에 대한 강성행렬은 Table 1과 같다.

Table 1 Element stiffness matrix of isolation bearings

K_x					$-K_x$				
	K_y				$-K_y$				
		K_z			$-K_z$				
			R_x				$-R_x$		
				R_y				$-R_y$	
					R_z				$-R_z$
	symm.				K_x				
						K_y			
							K_z		
								R_x	
									R_y
									R_z

x : longitudinal direction, z : transverse direction

3.2 유한요소 프로그램의 작성

유한요소해석 프로그램을 작성하는 방법은 사용목적에 맞는 전용 프로그램을 새롭게 작성하는 방법과 사용자가 개발한 요소를 추가할 수 있는 모듈화된 범용 유한요소해석 프로그램을 이용하는 방법으로 구분될 수 있다. 전자의 방법은 전용프로그램으로서 입력자료의 작성이 간단하고 해석시간을 줄일 수 있는 장점이 있는 반면에 이미 개발된 또는 앞으로 개발될 다른 종류의 요소와 조합으로 사용하기가 곤란하다.

이 연구에서는 후자의 방법을 택하여 저자 등에 의하여 그 동안 개발된 철근콘크리트 평면응력요소, 그리고 경계면 요소 등^{(9),(10),(12)}을 미국 버클리 대학의 Taylor가 개발한 범용 유한요소해석 프로그램인 FEAP⁽¹⁸⁾에 이식하여 모듈화된 비선형 유한요소해석 프로그램인 RCAHEST(Reinforced Concrete Analysis in Higher Evaluation System Technology)⁽⁸⁾에 개발한 지진격리요소(seismic isolator element)를 이식하여 사용하였다.

4. 해석모델의 타당성 검증 및 고찰

이 연구에서 제안한 해석기법과 모델의 타당성을 검증하기 위해서 Fig. 4~6에 나타난 것과 같은 철근콘크리트 교각의 실험체⁽¹⁵⁾를 선정하였다. 이 실험체를 해석 예로 채택한 이유는 지진하중과 같은 반복하중을 받는 철근콘크리트 교각의 적층고무받침의 영향 등을 정량화 시킨 실험이기 때문이다.

4.1 선정된 실험체의 제원⁽¹⁵⁾

실험체의 제원은 Table 2, 3과 같으며 이들 실험체에 대한 재하방법은 Fig. 7에 나타난 것과 같다. 재하는 교각기초부에서 주철근이 항복할 때, 하중작용위치에 생기는 변위를 항복변위 δ_y 로 정의하고, 이 변위의 정수 배 $n \times \delta_y$ ($n=1, 2, 3 \dots$)로 순차적으로 변위진폭을 증가시켰으며 동일한 재하변위진폭에 있어서 반복회수를 3회로 하였다(Fig. 8).

4.2 유한요소해석을 위한 요소분할

Fig. 9는 비선형 유한요소해석을 수행하기 위하여 요소 분할한 예이며 3점 가우스 적분을 적용한 8절점 등매개 요소를 이용하였고 하중이 재하되는 부위에는 실험체에서와 동일한 조건을 부여하기 위하여 균열이 발생하지 않는 탄성요소를 사용하였다. 또한, 기초와 교각의 접합부에는 정착슬립 등의 불연속 변위를 고려하기 위하여 6절점 경계면 요소를 이용하였고 적층고무받침의 거동을 고려하기 위한 2절점 지진격리요소를 사용하였다.

4.3 해석 결과

Fig. 10~Fig. 12는 이 연구의 해석모델을 적용한 유한요소해석 결과와 실험에 의한 하중-변위 관계를 나타내고 있

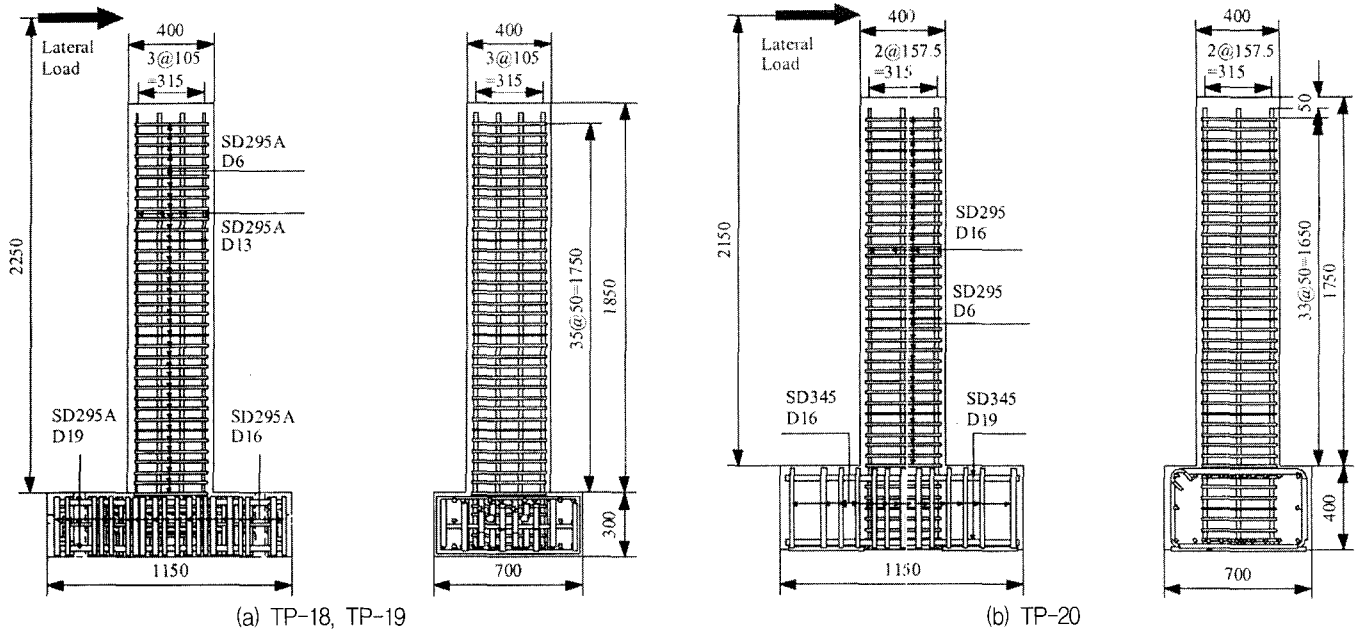


Fig. 4 Test specimens(unit : mm)

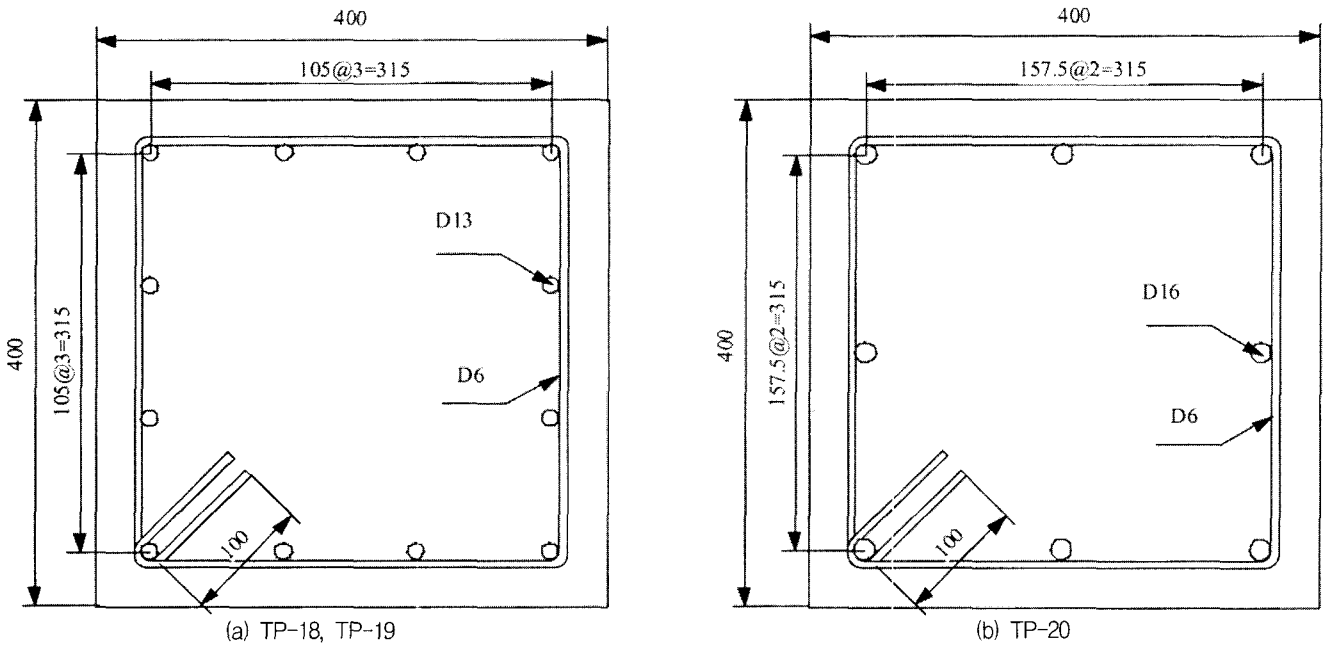


Fig. 5 Cross sections(unit : mm)

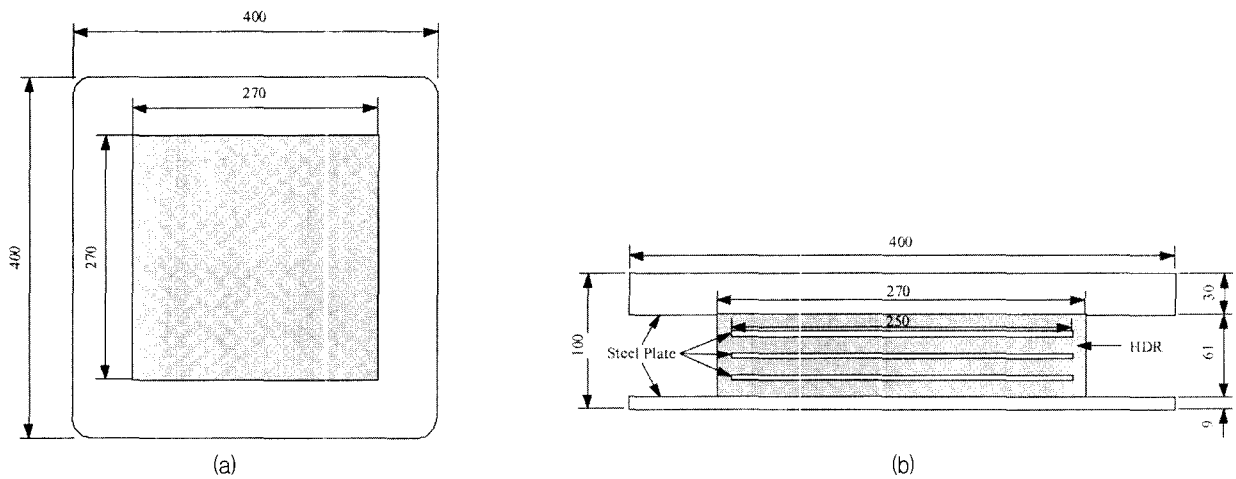


Fig. 6 High damping rubber bearing(unit : mm)

Table 2 Test specimens

Item	TP-18	TP-19	TP-20
Section Size(mm)	400×400(Square)		
Column Height(mm)	1850		1750
Effective Depth(mm)	360		
Longitudinal Reinforcement Ratio(%)	0.95		0.99
Volumetric Ratio of Tie Reinforcement(%)	0.77		
Cylinder Strength of Concrete(MPa)	20.6	20.6	29.1
Longitudinal Reinforcement(Yield Strength)	SD295A D13(367MPa)		SD295A D16(374MPa)
Tie Reinforcement(Yield Strength)	SD295A D6(376MPa)		SD295A D6(363MPa)
Axial Force(kN)	192(1.23MPa)		

Table 3 Properties of high damping rubber bearing

Cross Section Size(mm)	270×270
Effective Size(mm)	250×250
Thickness of HDR Bearing(mm)	61
Thickness of Rubber	13mm @ 4 Layer = 52mm
Thickness of Steel Plate	3mm @ 3 Layer = 9mm
Maximum Reaction Force(kN)	160
Minimum Reaction Force(kN)	100
Design Displacement(mm)	80
Effective Design Displacement(mm)	56
Shear Modulus(MPa)	1.2
Yield Displacement(mm)	7.0
Yield Force(kN)	30
Initial Stiffness(kN/mm)	4.29
Second Stiffness(kN/mm)	0.914

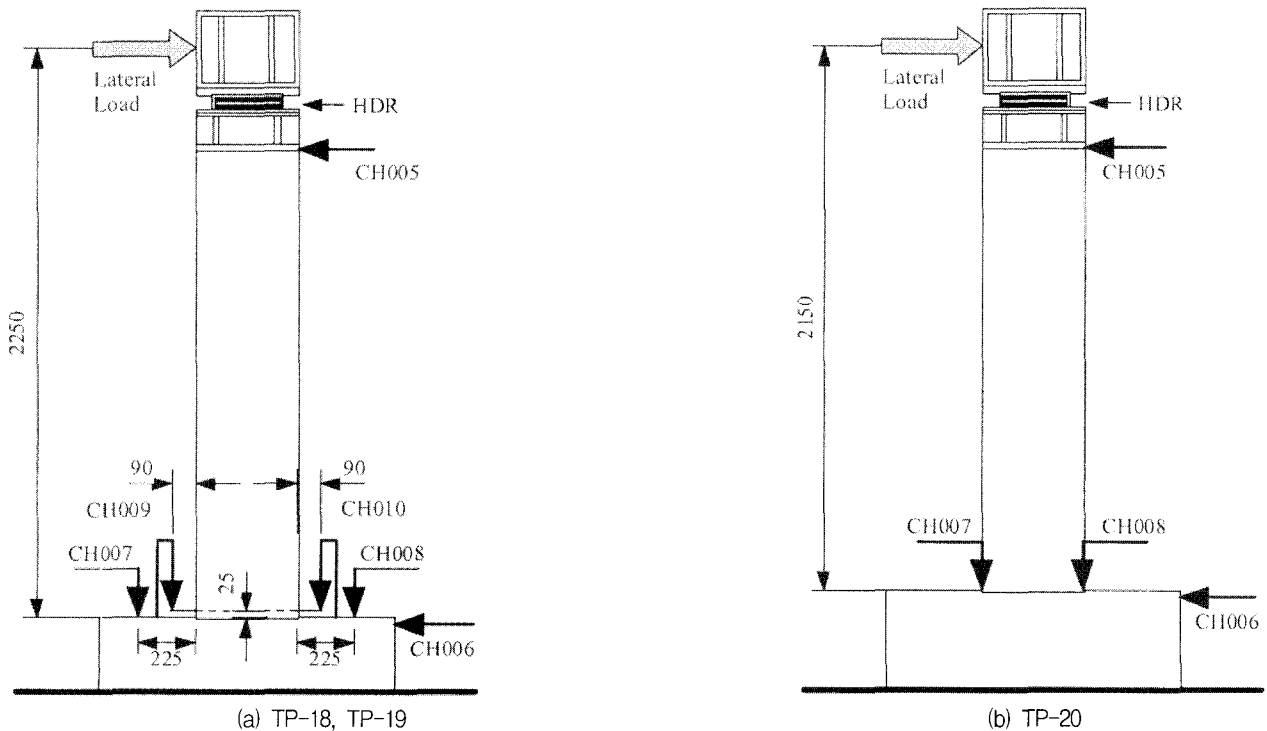


Fig. 7 Test setup

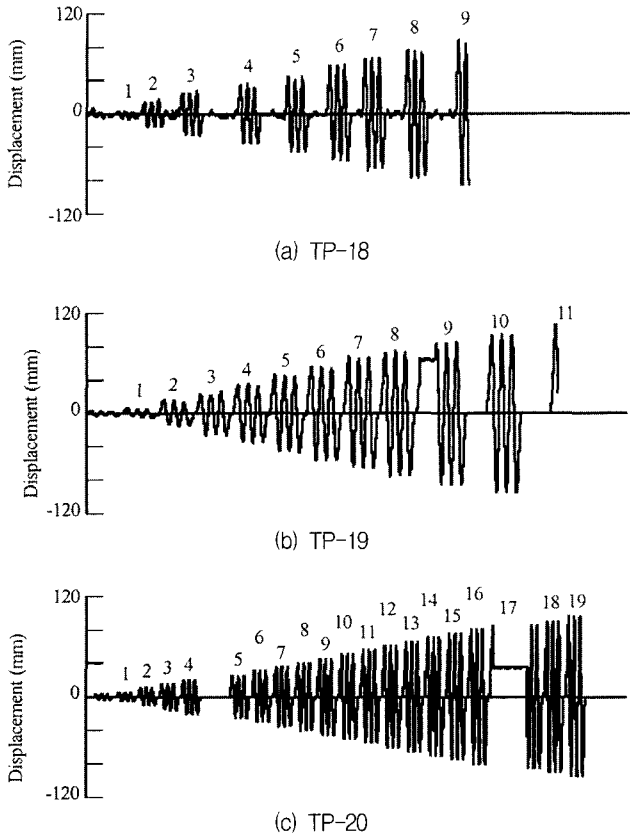


Fig. 8 Loading hysteresses

으며 해석결과가 실험결과와 전반적으로 잘 일치함을 알 수 있다. 다만 TP-20 실험체에 대하여는 이 연구의 해석결과가 실험결과에 비하여 이력곡선을 다소 slim하게 평가하고 있는데 추후 이에 대한 원인규명이 필요할 것으로 판단된다.

면진설계에 의하여 지진격리장치가 사용된 교각은 유연성으로 인하여 변위 응답이 증대되고 P- Δ 효과가 크게 나타나는 경우가 있다. 즉 수평 관성력에 의해 생기는 휨모멘트 외에 중력에 의한 휨모멘트가 발생하며 초기의 유효강성

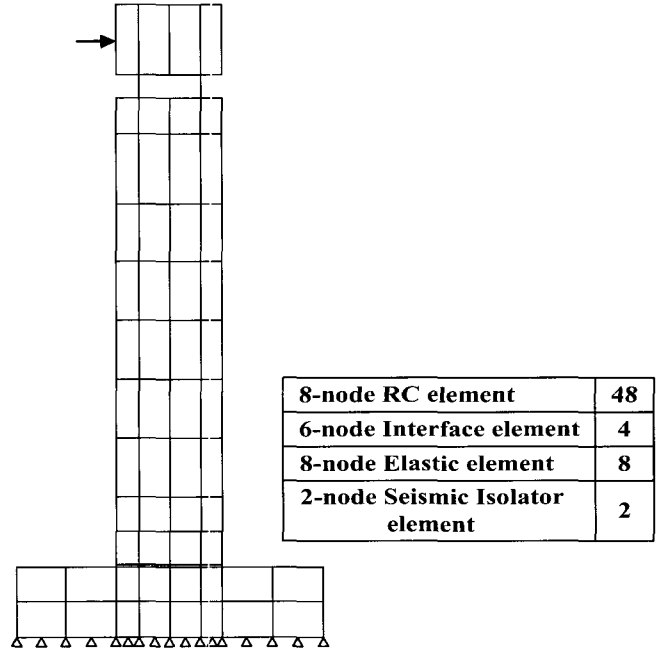


Fig. 9 Finite element mesh used for analysis(TP-18)

이 감소되고 항복후의 강성이 음이 되는 등 수평하중-수평변위 관계에도 영향을 주게 된다. 이 연구에서는 P- Δ 효과를 고려하지 않은 경우와 고려한 경우를 각각 해석하고 실험과 비교·검토하여 그 필요성을 확인하였다.

4.4 검증 및 고찰

Fig. 13~Fig. 16은 TP-19 구조시스템의 수평하중-수평변위 관계를 하중재하에 따라 지진격리장치와 기초-교각의 성분으로 구분하여 나타내고 있으며 해석결과가 실험결과와 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 이를 통해 개발한 지진격리 요소는 적층고무받침의 선형 영역, 항복 영역, 그리고 변형 경화가 일어나는 영역까지의 거동특성을 잘 표현하고 있음을 확인하였다.

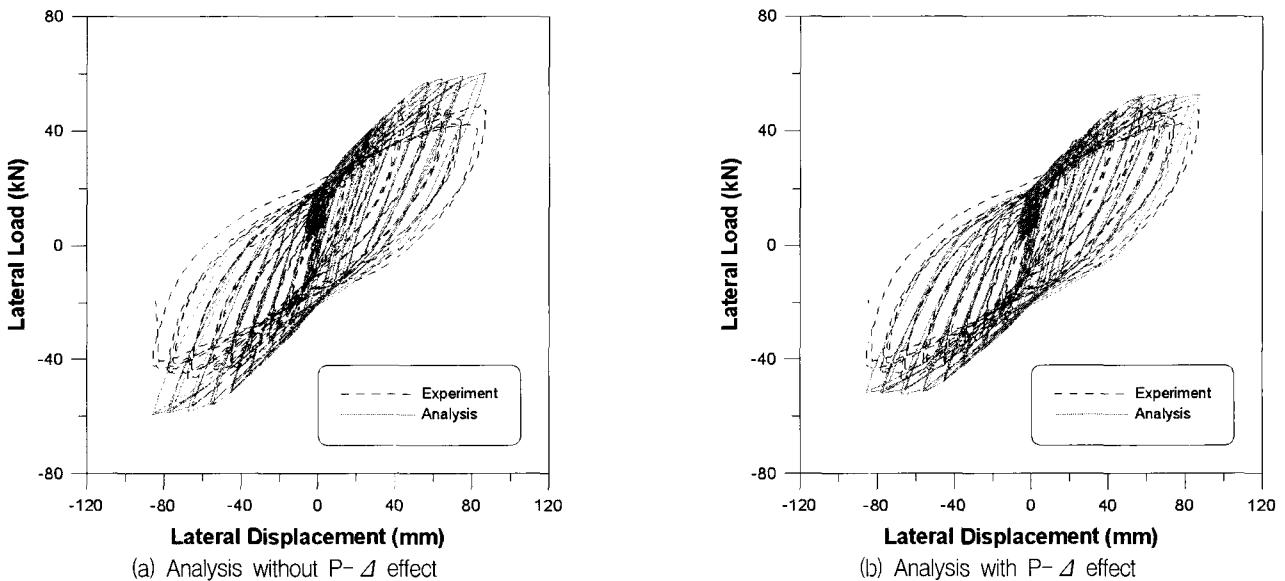


Fig. 10 Lateral Load vs. Lateral Displacement hysteresis for specimen TP-18

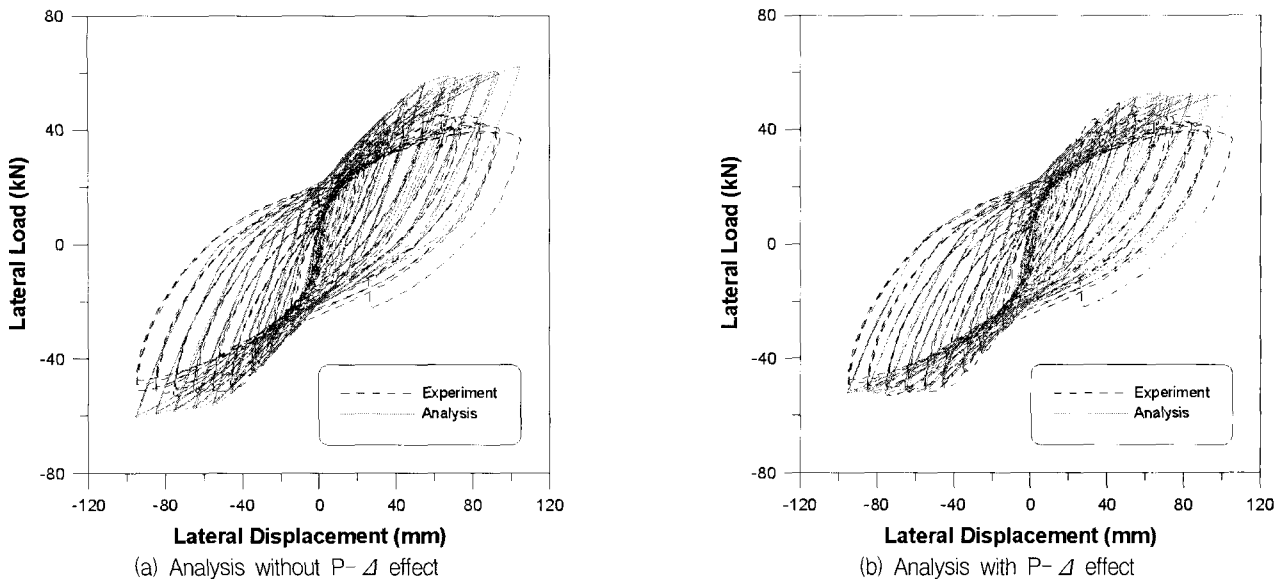


Fig. 11 Lateral Load vs. Lateral Displacement hysteresis for specimen TP-19

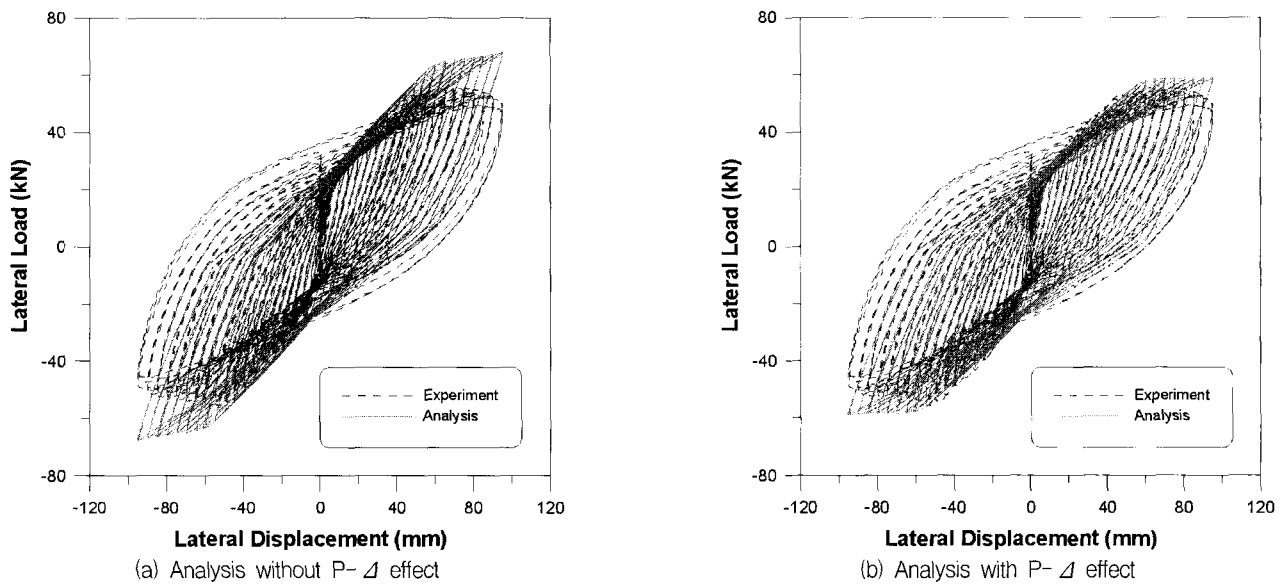


Fig. 12 Lateral Load vs. Lateral Displacement hysteresis for specimen TP-20

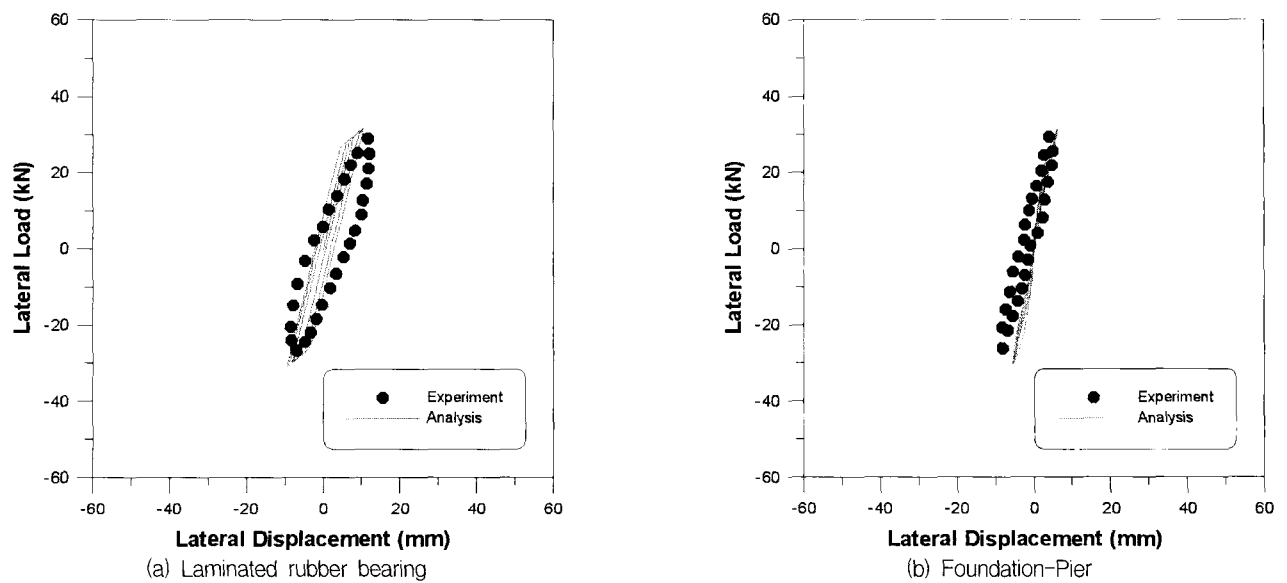


Fig. 13 Lateral Load vs. Lateral Displacement hysteresis for specimen TP-19 (15 mm)

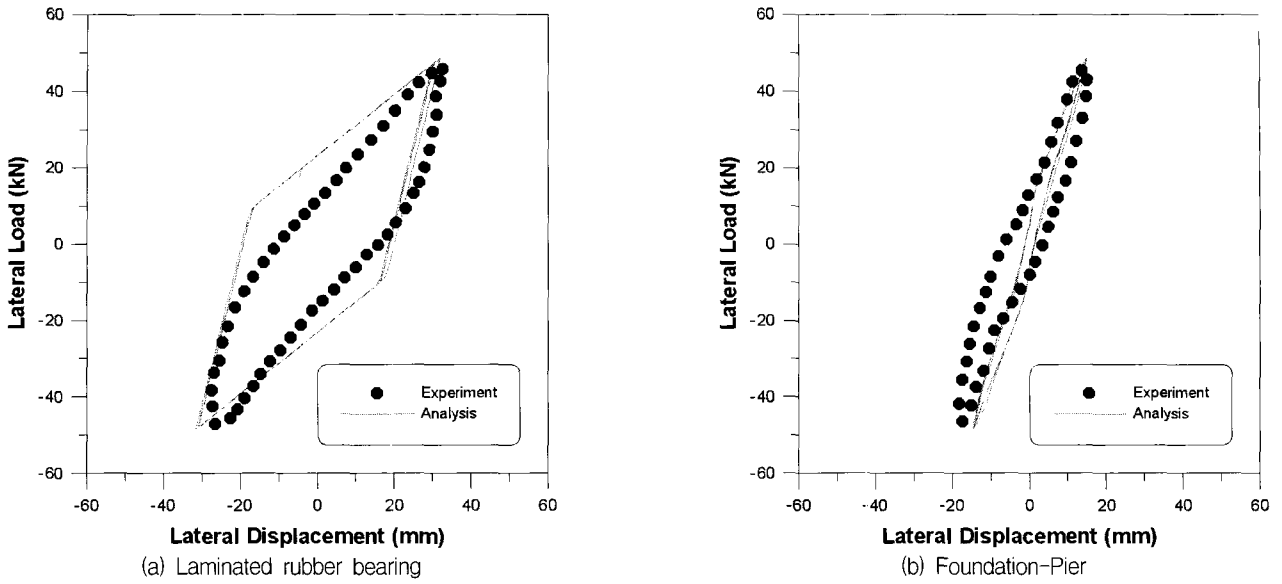


Fig. 14 Lateral Load vs. Lateral Displacement hysteresis for specimen TP-19(45mm)

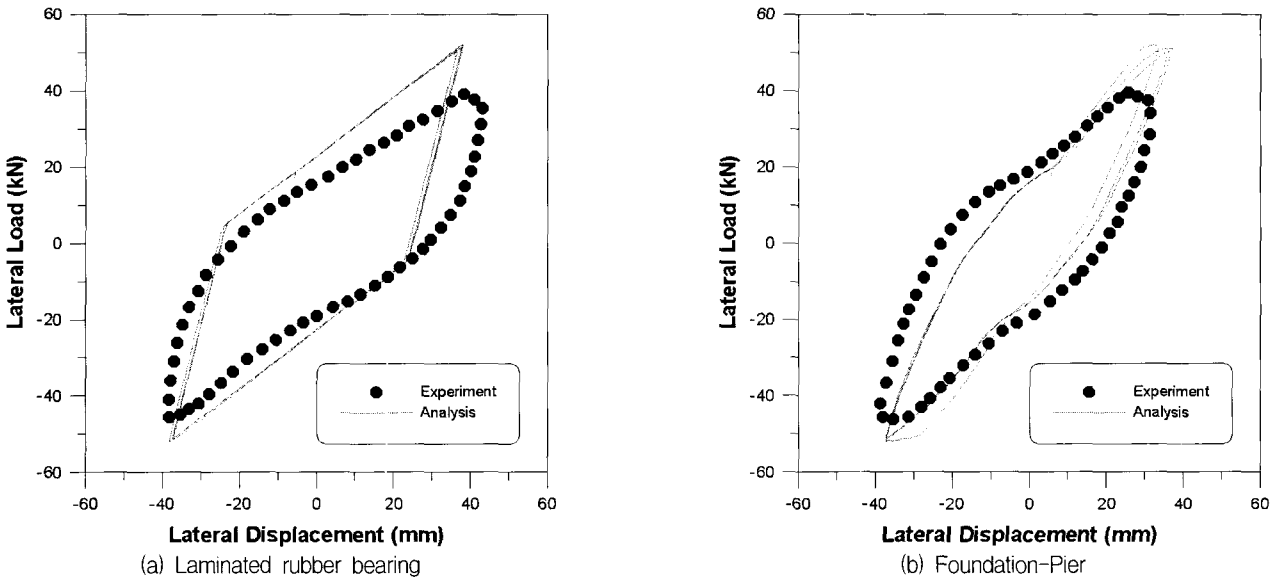


Fig. 15 Lateral Load vs. Lateral Displacement hysteresis for specimen TP-19(75mm)

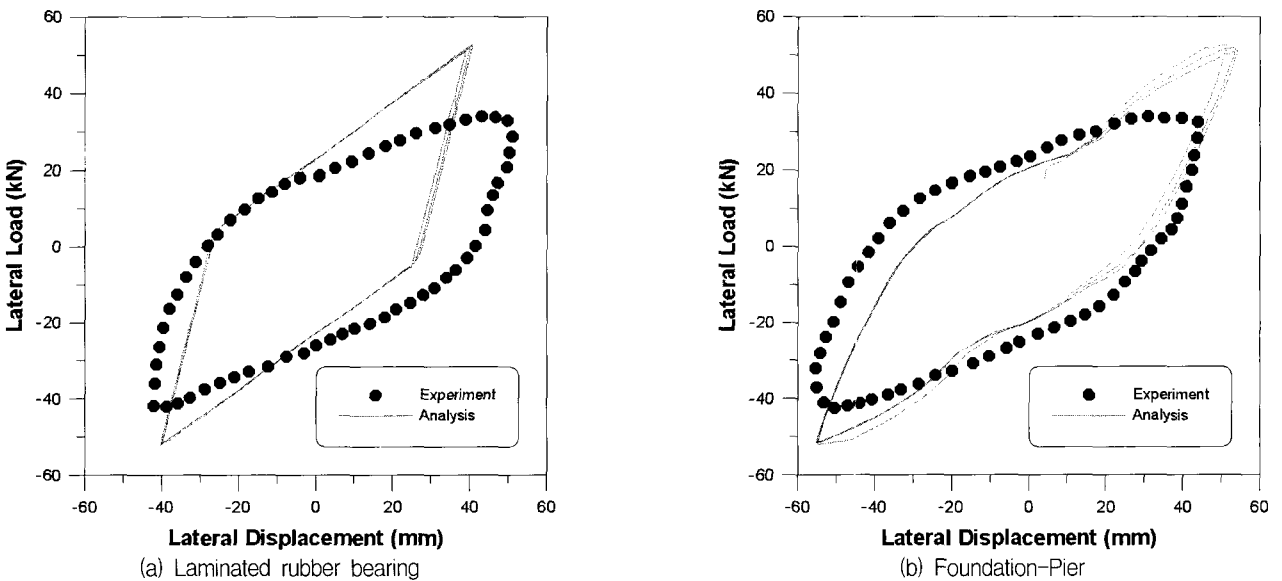
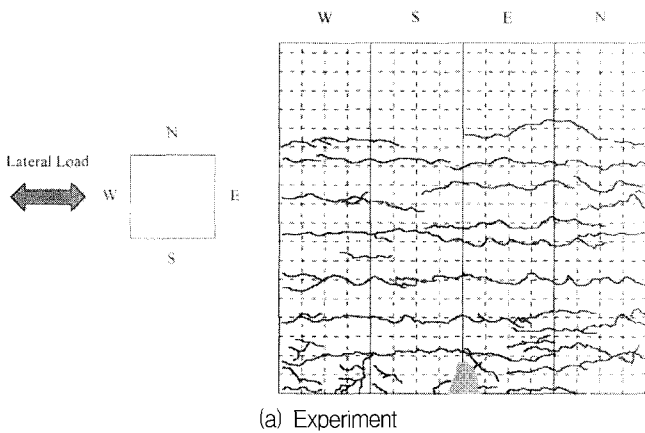


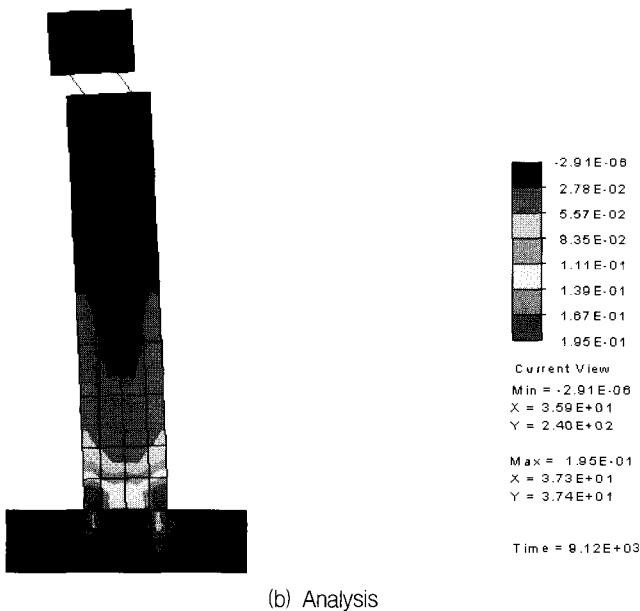
Fig. 16 Lateral Load vs. Lateral Displacement hysteresis for specimen TP-19(95mm)

Fig. 17은 파괴시점의 요소레벨의 손상지수도⁽¹⁰⁾와 실험결과를 비교한 예이며 구조물의 중요한 비선형 거동특성인 소성힌지 형성 부위가 잘 일치함을 알 수 있다. 이러한 가시화된 요소레벨의 손상지수를 통하여 철근콘크리트 교각의 손상정도를 쉽게 검색할 수 있으며 내진성능평가에 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

일련의 해석결과와 실험결과와의 비교로부터 이 연구에서 제안하고 있는 방법은 적층고무받침을 사용한 철근콘크리트 교각의 비탄성 거동을 적절히 평가하고 있으며, 개발된 철근콘크리트 구조물의 비선형 유한요소해석 프로그램(RCAHEST)을 이용함으로써, 해석적 방법에 의한 신설 또는 기존 철근콘크리트 교각의 내진성능평가가 가능할 것으로 판단된다.



(a) Experiment



(b) Analysis

Fig. 17 Failure mode for specimen TP-19

5. 결 론

이 연구에서는 적층고무받침을 설치한 실험용 교각에 대하여 비선형 유한요소해석을 수행하였으며 이를 실험결과와 비교하여 해석의 타당성을 검증하였다. 철근 콘크리트의 재료적인 비선형 모델을 적용한 유한요소프로그램(RCAHEST)

에 지진격리요소를 추가하여 반복하중을 받는 교각 실험체에 대한 비선형해석을 수행하였으며, 실험결과와 비교·검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 철근콘크리트 평면응력요소, 탄소성 요소, 부재의 경계면에서 불연속변형을 고려한 경계면 요소 그리고 지진격리요소 등을 사용하여 적층고무받침이 설치된 철근콘크리트 교각에 대한 비선형해석을 수행한 결과, 제안한 해석방법과 모델이 철근콘크리트 교각의 전반적인 거동특성을 잘 예측하고 있는 것으로 나타났다.
- 2) 3차원 spring 요소에 탄소성 bilinear 모델을 적용하여 개발한 지진격리요소는 적층고무받침의 비선형 거동 특성을 적절하게 표현하고 있으며 기초-교각-면진장치-거더의 전체시스템을 모델화 하는 방법에 이용할 수 있을 것으로 판단된다.
- 3) 각 재하단계별로 해석에서 얻은 적층고무받침과 철근콘크리트 교각의 수평하중-수평변위 관계는 실험치와 유사하게 나타나고 있으며 그 크기에 있어서도 비교적 정확하게 예측하고 있다. 따라서 이 해석방법은 지진격리시스템에 의한 거동을 적절하게 예측할 수 있을 것이며 내진성능평가, 내진보강 및 설계 검토 등에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 연구는 지진공학연구센터(KEERC)를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원 및 교량설계 핵심기술연구단 지원으로 수행되었음을 밝히며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Priestley, M. J. N., Seible, F., and Calvi, G. M., *Seismic Design and Retrofit of Bridges*, John Wiley & Sons, Inc., 1996.
2. Roeder, C. W. and Stanton, J. F., "State-of-the-Art Elastomeric Bridge Bearing Design," *ACI Structural Journal*, Vol. 88, No. 1, 1991, pp. 31-41.
3. Juhn, G., Manolis, G. D., Constantinou, M. C., and Reinhorn, A. M., "Experimental Study of Secondary Systems in Base-Isolated Structure," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 118, No. 8, 1992, pp. 2204-2221.
4. Tsopelas, P., Okamoto, S., Constantinou, M. C., Ozaki, D., and Fujii, S., "NCEER-Taisei Corporation Research Program on Sliding Isolation Systems for Bridges: Experimental and Analytical Study of Systems Consisting of Sliding Bearings, Rubber Restoring Force Devices and Fluid Dampers," *Report No. NCEER 94-0002*, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo, 1994.

5. 윤정방, 정우정, 김남식, 김두훈, "기초격리된 구조물의 내진성능평가를 위한 실험방법", 한국지진공학회 논문집, 제1권, 4호, 1997, pp. 45-58.
6. Kawashima, K. and Shoji, G., "Interaction of Hysteretic Behavior between Isolator/Damper and Pier is an Isolated Bridges," *Structural Engineering*, JSCE, Vol. 44A, 1998, pp. 733-741.
7. 김효범, 김영석, 정길영, 음성우, "PTFE 고무받침을 적용한 축소교량의 해석적 연구", 대한토목학회 논문집, 제 20권, 제1-A호, 2000, pp. 59-67.
8. 김태훈, 신현목, "Analytical Approach to Evaluate the Inelastic Behaviors of Reinforced Concrete Structures under Seismic Loads," 한국지진공학회 논문집, 제5권, 제2호, 2001, pp. 113-124.
9. Kim, T. H., Lee, K. M., Yoon, C. Y., and Shin, H. M., "Inelastic Behavior and Ductility Capacity of Reinforced Concrete Bridge Piers under Earthquake. I: Theory and Formulation," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, V. 129, No. 9, 2003, pp. 1199-1207.
10. 김태훈, "비선형 유한요소해석을 이용한 철근콘크리트 교각의 내진성능평가", 박사학위논문, 성균관대학교, 2003.
11. Kent, D. C. and Park, R., "Flexural Members with Confined Concrete," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 97, No. 7, 1971, pp. 1969-1990.
12. 김태훈, 김운학, 신현목, "변동 축하중을 받는 철근콘크리트 교각의 내진성능평가", 한국지진공학회 논문집, 제 7권, 제2호, 2003, pp. 67-73.
13. Mander, J. B., Panthaki, F. D., and Kasalanati, K., "Low-Cycle Fatigue Behavior of Reinforcing Steel," *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, Vol. 6, No. 4, 1994, pp. 453-468.
14. Kakuta, Y., Okamura, H., and Kohno, M., "New Concepts for Concrete Fatigue Design Procedures in Japan," *IABSE Colloquium on Fatigue of Steel and Concrete Structures*, Lausanne, 1982, pp. 51-58.
15. Kawashima, K. and Shoji, G., "Cyclic and Hybrid Loading Tests for Reinforced Concrete Columns Supported by High Damping Rubber Bearings," *Proc. 3rd Regional Symposium on Infrastructure Development in Civil Engineering*, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan, 2000, pp. 163-172.
16. Naeim, F. and Kelly, J. M., *Design of Seismic Isolated Structures from Theory to Practice*, John Willey & Sons, Inc., 1999.
17. Logan, D. L., *A First Course in the Finite Element Method*, PWS-KENT, 1992.
18. Taylor, R. L., *FEAP - A Finite Element Analysis Program*, Version 7.2, Users Manual, Vol. 1 and Vol. 2, 2000.