



삼각망 철근상세를 갖는 현장타설 및 조립식 중공 철근콘크리트 교각의 비선형 지진해석

김태훈^{1)*} · 나경웅¹⁾ · 이재훈²⁾ · 신현목³⁾

¹⁾삼성물산(주) 건설부문 품질기술실 ²⁾영남대학교 건설시스템공학과 ³⁾성균관대학교 건축토목공학부

Nonlinear Seismic Analysis of Hollow Cast-in-place and Precast RC Bridge Columns with Triangular Reinforcement Details

Tae-Hoon Kim,^{1)*} Kyeong-Woong Ra,¹⁾ Jae-Hoon Lee,²⁾ and Hyun Mock Shin³⁾

¹⁾Quality Technology Division, Samsung Construction & Trading Corporation, Seongnam 13530, Rep. of Korea

²⁾Department of Civil Engineering, Yeungnam University, Gyeongsan 38541, Rep. of Korea

³⁾School Civil and Architectural Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Rep. of Korea

ABSTRACT The goal of this study was to assess the seismic performance of hollow cast-in-place and precast reinforced concrete bridge columns with triangular reinforcement details. The developed material quantity reduction details are economically feasible and rational, and facilitate shorter construction periods. By using a sophisticated nonlinear finite element analysis program, the accuracy and objectivity of the assessment process can be enhanced. The used numerical method gives a realistic prediction of seismic performance throughout the input ground motions for several hollow column specimens investigated. As a result, triangular reinforcement details were designed to be superior to the existing reinforcement details in terms of required seismic performance.

Keywords : seismic performance, hollow, cast-in-place, precast, bridge columns, triangular reinforcement details, economically feasible, numerical method

1. 서 론

이 연구는 새로운 중공 철근콘크리트 교각 시스템을 개발하기 위한 일련의 연구로서 중공단면 교각의 횡방향 철근을 외측 횡철근과 보강 횡철근에 의한 삼각 구도로 구성하여 내측 횡철근을 없애거나 줄인 현장타설 및 조립식 물량저감 중공교각⁽⁴⁾의 지진응답을 해석적으로 예측하고 그 내진성능을 평가하는데 목적이 있다.

개발된 현장타설 및 조립식 물량저감 중공 철근콘크리트 교각은 경제성과 합리성을 고려한 새로운 삼각망 형태의 철근 배근상세를 가지며 배근작업이 용이하고 급속시공이 가능한 특징 등을 갖고 있다.

교각 시스템의 내진성능을 평가하기 위한 실험으로는 준정적 실험, 유사동적 실험, 그리고 진동대 실험이 있다. 국내에서 교각의 교각에 대한 내진 실험은 주로 준정적 실험과 유사동적 실험이 수행되어 왔다.^{5,6)}

이 연구의 대상인 중공 철근콘크리트 교각의 경우 국내에 있는 진동대 용량의 한계로 축소모델의 경우에도 진동대 실험이 쉽게 이루어지기 힘든 여건이다. 따라서 개발된 현장타설 및 조립식 물량저감 중공 철근콘크리트 교각 시스템의 진동대 실험에 관한 적절한 시물레이션 기법의 개발이 이루어진다면, 다양한 교각에 대한 비선형 지진해석을 통해 내진성능평가가 가능할 것이다.

진동대 실험의 지반 운동은 주로 원역지진지반가속도(far field ground motion)가 다루어 졌으나 최근에는 근단층지반운동(near fault ground motion)의 관심이 높아지고 있다.

단층 근처 지역에서 지반운동의 특징적인 모습들은 Northridge 지진 (1994), Hyogo-ken Nanbu 지진(1995), Izmit 지진(1999), Sichuan 지진(2008), Haiti 지진(2010) 등에서 확인해 볼 수 있으며 밀집된 도심지역에서 심각한 손상을 유발함을 보여주고 있다. 따라서 교각의 내진성능평가에서 근단층지반운동은 반드시 검토할 필요가 있을 것으로 판단된다.⁷⁾

근단층지반운동은 큰 진폭의 장주기 속도 펄스를 갖는 특징을 갖고 있으며 일반적으로 진앙거리가 약 10 km 이내인 지역에서 관측되는 지진지반운동을 말한다. 이러한 근단층

*Corresponding author E-mail : th1970.kim@samsung.com

Received August 1, 2016, Revised September 4, 2016,

Accepted September 5, 2016

©2016 by Korea Concrete Institute

지반운동은 단층파열의 전파와 전단파의 전파가 서로 간섭을 일으켜 발생하며 근단층운동이 진행되는 방향에 평행인 경우와 직각인 경우로 각각 구분된다.

이 연구에서는 개발된 현장타설 및 조립식 물량저감 중공 철근콘크리트 교각의 내진성능평가를 위하여 국내 근단층 지반운동에 대한 모델링⁸⁾에서 도출된 지반운동중 근단층운동이 진행되는 방향에 직각인 경우의 비선형 지진해석을 수행하였다.

2. 현장타설 및 조립식 물량저감 중공 철근콘크리트 교각

선행연구¹⁻⁴⁾에서 개발된 현장타설 및 조립식 물량저감 중공 철근콘크리트 교각 시스템은 Fig. 1과 같다. 축방향으로 배근되는 외측 축방향철근과 2본 또는 3본의 외측 축방향철근 사이에 위치하도록 배근되는 내측 축방향 철근, 외측 축방향철근 바깥을 둘러 감으면서 배근되는 외측 횡철근과 외측 축방향철근과 내측 축방향철근을 삼각망으로 연결하는 보강 횡철근을 주요 특징으로 하는 새로운 삼각망 철근상세를 개발하였다.

이때 조립식 물량저감 중공 교각⁴⁾의 각 세그먼트는 기본적으로 공장에서 매치 캐스팅으로 제작되며, 축방향 철근이 나중에 삽입되는 위치에 쉬스(sheath)를 미리 배치한다. 현장에 운반된 각 세그먼트는 접합면에 에폭시를 도포하며 적층하고 이때 접착 에폭시는 경화될 때까지 0.3 MPa의 평균

응력이 전이음면에 작용되어야 한다.⁹⁾ 그리고 세그먼트 적층이 완료된 후 위에서 축방향 철근을 쉬스 내에 삽입하고 덕트 내부로 무수축 모르타르를 주입하여 교각 시스템을 완성한다.

종래의 중공교각 철근상세는 축방향으로 내·외측 축방향철근을 배근하고 내·외측 축방향철근을 각각 둘러 감도록 내·외측 횡철근을 배근하며, 내·외측 축방향철근을 동시에 둘러 감도록 보강 횡철근으로 배근하는 방식을 따르고 있다. 이 방식은 배근공간의 확보가 어렵고 내·외측 횡철근과 보강 횡철근 사이에 간섭이 생기는 등 배근작업이 복잡한 단점을 갖고 있다.

개발된 현장타설 및 조립식 물량저감 중공 철근콘크리트 교각은 기존 철근상세가 갖고 있는 이러한 문제점을 해결하고 경제성과 합리성을 동시에 만족시킬 수 있다. 즉 내·외측 축방향철근이 내측보다 외측에 상대적으로 더 많이 배근되어 기존의 배근구조보다 구조적으로 유리한 거동 특성을 갖고, 외측 횡철근과 보강 횡철근의 안정적인 삼각 구도에 의한 구속 응력으로 콘크리트의 3축 구속을 실현할 수 있기 때문에 취성 파괴에 유리하게 저항할 수 있으며 이를 통해 소성거동 능력에 미치는 영향이 미미한 내측 횡철근을 생략하거나 줄일 수 있다. 또한 손상의 주요 원인인 축방향 철근의 좌굴을 삼각망 보강 횡철근에 의해 직접적으로 방지할 수 있다.

이 연구의 목적인 현장타설 및 조립식 물량저감 중공 철근콘크리트 교각의 내진성능을 비선형 지진해석을 통해 파악하기 위해서 Table 1에 나타난 것과 같은 선행 연구^{3,4)}의 교각 실험체를 선정하였으며 모델 상세의 예는 Fig. 2, 3과 같다. 이때 교각 실험체의 설계는 현행 도로교설계기준,⁹⁾ 콘크리트구조기준,¹⁰⁾ 그리고 AASHTO LRFD¹¹⁾를 근거로 하였으며 횡방향 철근량은 중공내부가 채워진 중실단면으로 가정하고 외측 횡철근만 고려하여 산정하였다.

현장타설 중공원형 교각 실험체는 외경 1,400 mm, 내경 1,050 mm 그리고 높이는 4,900 mm로 형상비가 3.5으로서 휨파괴 거동을 유도하였으며 이때 중공치수비(내경/외경)는 0.75로 현재 실험체 제작이 가능한 최대치수이다. 그리고 조립식 중공 교각 실험체의 단면은 외경이 1000 mm, 내경이 500 mm인 중공 사각형으로서 교각의 하중 재하점까지의 높이는 4,500 mm이다.

준정적 실험에 대한 세부적인 실험결과는 참고문헌^{3,4)}에 자세히 설명되어있으며 대표적인 결과를 Fig. 4에 나타내었다.

개발된 현장타설 및 조립식 물량저감 중공 철근콘크리트 교각 시스템은 선행연구의 준정적 실험 및 해석을 통해 기존 중공 교각과 강도, 연성, 에너지 소산능력 등의 면에서 동등 이상의 성능을 보이고 있음이 확인되었다.

3. 현장타설 및 조립식 물량저감 중공 철근콘크리트 교각의 지진해석

이 연구에서는 그동안 개발된 비선형 유한요소해석 프로

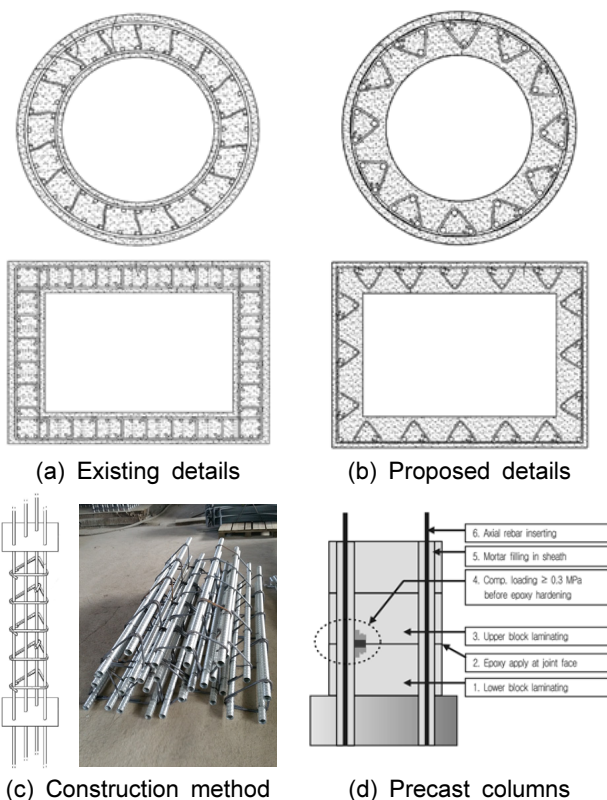


Fig. 1 Hollow cast-in-place and precast columns with triangular reinforcement details^{3,4)}

Table 1 Properties of test specimens^{3,4)}

Specimen		Cast-in-place			Precast		
		S-CHC-80	S-CHT-80	S-CHNT-80	S-PRHC-80	S-PRHT-80	S-PRHT-120
Cylinder concrete strength (MPa)		28.1	24.3	27.4	47.0		
Longi. reinf. (D19)	f_{yl} (MPa)	408.3			408.3		
	ρ_l (%)	1.5			1.53	1.38	
Trans. reinf. (D13)	f_{yt} (MPa)	405.7			405.7		
	Space (mm)	Outer @80, Inner @80	Outer @80, Inner @80	Outer @80, Inner @400	Outer @80, Inner @80	Outer @80, Inner @400	Outer @120, Inner @360
	Ratio (Compared to current code)	Outer 0.0047 (49%), Inner 0.0047 (49%)	Outer 0.0047 (49%), Inner 0.0047 (49%)	Outer 0.0047 (49%), Inner 0.0009 (10%)	Outer 0.0083 (52%), Inner 0.0083 (52%)	Outer 0.0100 (63%), Inner 0.0020 (13%)	Outer 0.0067 (42%), Inner 0.0022 (14%)
Cross-tie (D13)	f_{yt} (MPa)	405.7			405.7		
	Space (mm)	18@80	12@80	12@80	12@80	8@80	8@120
Axial force	$\frac{P}{f_{ck}A_g}$	0.1			0.07		

(Note) S-CHNT-80, S-PRHT-80, S-PRHT-120: Only outer lateral reinforcement

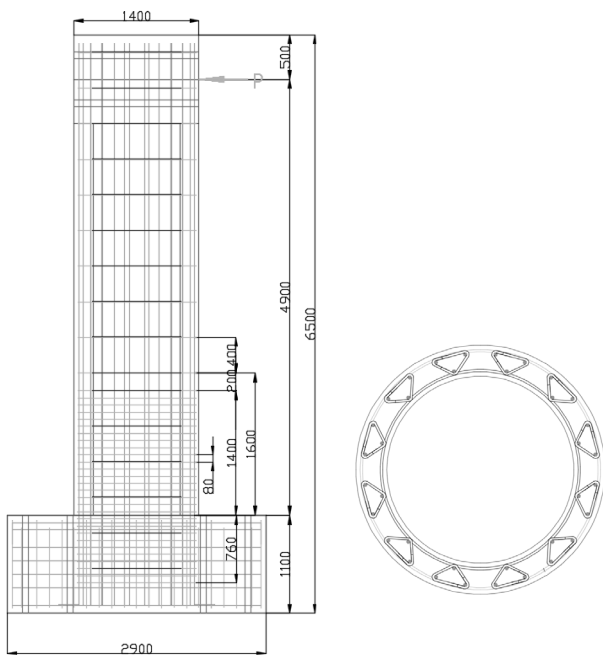


Fig. 2 Hollow cast-in-place bridge column (Unit: mm)³⁾

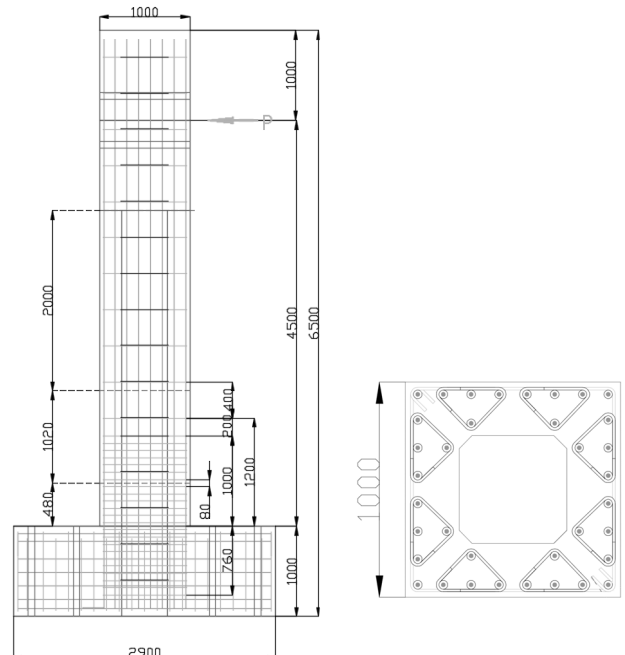
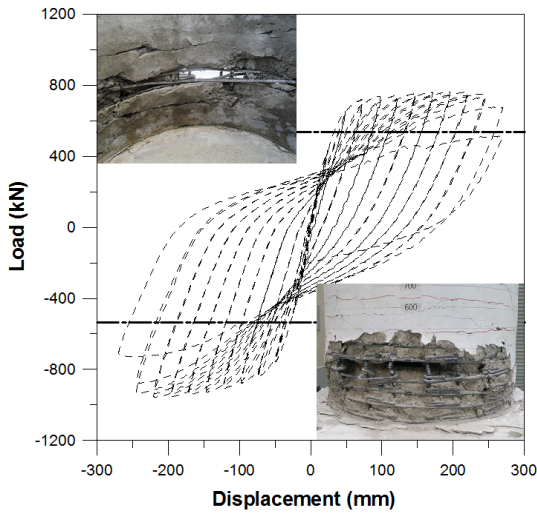


Fig. 3 Hollow precast bridge column (Unit: mm)⁴⁾

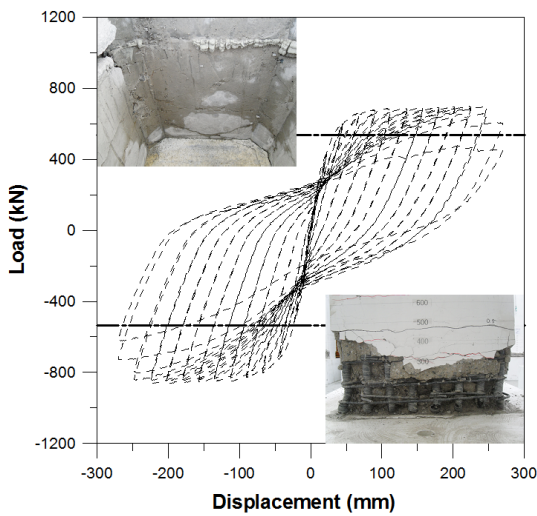
그럼 RCAHEST (Reinforced Concrete Analysis in Higher Evaluation System Technology)¹²⁻¹⁶⁾를 수정하여 사용하였다. RCAHEST는 미국 버클리 대학의 Taylor가 개발한 범용 유한요소해석 프로그램인 FEAP ver. 7.2¹⁷⁾에 저자 등에 의한 철근콘크리트 평면응력요소, 그리고 경계면요소 등을 이식

하여 모듈화한 프로그램이다.

철근콘크리트의 비선형 재료모델은 이미 발표된 재료모델¹²⁻¹⁶⁾을 그대로 적용하였다. 중공 단면의 구속효과는 축방향 철근 및 구속철근의 양, 구속철근의 항복강도, 그리고 배근형태 등을 고려할 수 있도록 한 Mander 등¹⁸⁾의 제안모델을



(a) S-CHT-80³



(b) S-PRHT-120⁴

Fig. 4 Lateral load-displacement relationship

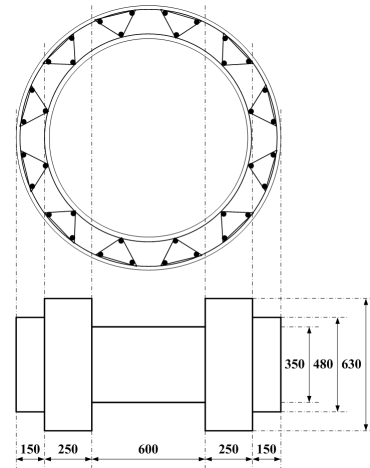
수정하였으며 중공치수비(내경/외경)에 따라 횡구속 효과를 저감시키는 수정계수¹⁻⁴⁾를 도입하였다.

이 연구에서 비선형 지진해석을 수행하기 위하여 요소 분할한 예를 Fig. 5, 6에 나타내었다.

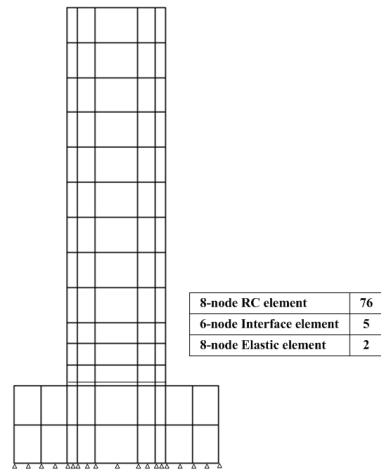
중공단면 교각 실험체들의 유한요소해석을 위해서 등가 환산단면을 이용하여 Fig. 5(a), 6(a)와 같이 2차원 평면요소로 해석이 가능하도록 하였다. 이때 등가환산단면은 중공단면 철근콘크리트 교각의 실제거동과 유사하도록 철근과 콘크리트의 단면적, 하중재하 방향의 단면 2차 모멘트를 같게 하여 유도하였다.

사용된 경계면 요소는 기본적으로 이산균열개념에 근거하고, 요소의 평행 및 직각방향으로만 응력이 발생하는 것으로 가정하고 있기 때문에 철근과 콘크리트의 재료모델을 수정 없이 그대로 적용할 수 있다. 그리고 경계면 요소의 변형은 인접한 두 부재간의 상대변위로부터 결정되기 때문에 압축응력-압축변위 및 전단응력-전단미끄러짐으로 요소의 응력-변형률 관계를 정의할 수 있다.

조립식 물량저감 교각의 세그먼트를 모사하기 위한 접합



(a) Transformation of a hollow circular column to an idealized equivalent rectangular column



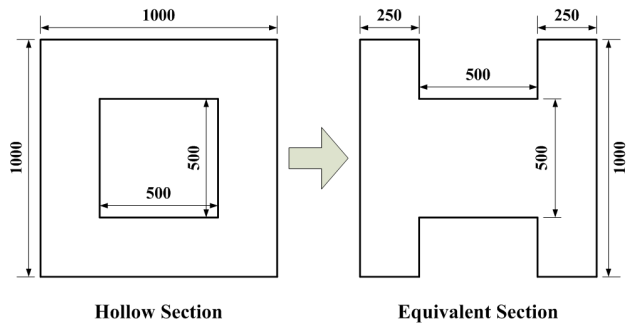
(b) Finite element mesh for analysis

Fig. 5 Finite element model for cast-in-place column

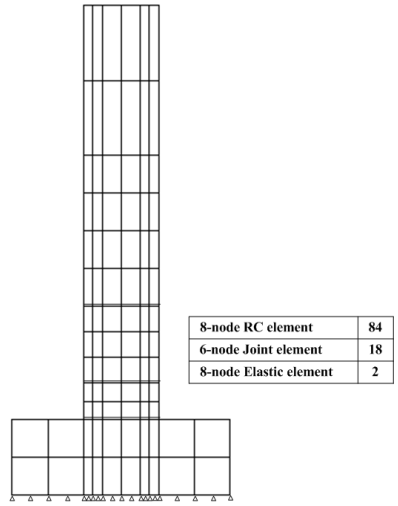
요소는 수직방향 2개 절점의 위치가 같은 가상의 절점을 이용한 6절점 접합요소 또는 4절점 접합요소 중 하나를 선택할 수 있다. 이러한 접합요소를 사용하면 접합부에 평행한 수평방향의 전단응력과 이에 수직방향의 인장응력 또는 압축응력을 결정할 수 있다. 그리고 접합부의 부착과괴 기준으로는 Coulomb 파괴기준을 사용하였으며, 세그먼트 접합부의 거동특성을 지배하는 내부마찰각과 점착력은 기존의 연구결과⁴⁾와 사용된 에폭시의 재료물성을 근거로 각각 45°와 5.88 MPa로 정하였다.

이 연구의 해석모델을 적용한 유한요소해석 결과와 실험에 의한 하중-변위 관계의 예를 Fig. 7에 나타내었으며 비교적 잘 일치함을 확인할 수 있다.

비선형 유한요소해석 결과에서 최대하중에 대한 실험값/해석값의 평균과 변동계수가 각각 0.96과 0.03으로서, 최대하중의 평균값은 전반적으로 실험결과를 정확하게 평가하고 있다. 그리고 변위연성도에 대한 실험값/해석값의 평균과 변동계수는 각각 0.91과 0.06로서, 변위연성도의 평균값은 실험결과보다 다소 크게 평가하고 있으나 실험체들의 내진성능을 포함한 비탄성 거동특성을 비교적 정확하게 평가



(a) Transformation of a hollow rectangular column to an idealized equivalent rectangular column



(b) Finite element mesh for analysis

Fig. 6 Finite element model for precast column

하고 있는 것으로 판단된다.

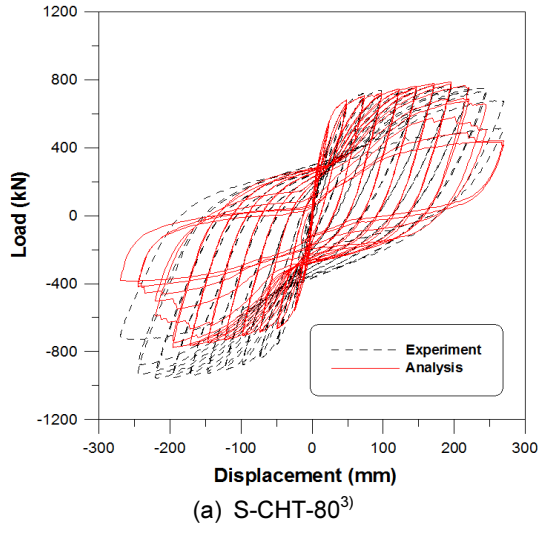
이 연구에서는 현장타설 및 조립식 물량저감 중공 철근콘크리트 교각의 내진성능을 근단층지반운동에 대해서 평가하기 위해 축소모형의 축력효과는 프리스트레스에 의해 구현하며 질량 효과는 별도의 질량모사 프레임(Fig. 8)을 제작하여 수행한 실험과 해석결과¹⁹⁾를 근거로 진동대 실험을 모사하기 위한 비선형 지진해석을 수행하였다.

지반운동은 국내에서 중규모지진에 의한 근단층지반운동 모델을 수행하여 얻어진 결과를 이용하였고 단계별로 가속도 수준을 높여 파괴에 이르도록 하였다. 즉 0.0627 g, 0.0803 g, 0.11 g, 0.154 g, 0.22 g, 0.3 g, 0.4 g, 0.5 g, 0.6 g, 0.7 g, 0.8 g, 0.9 g까지 가진을 실시하였다.

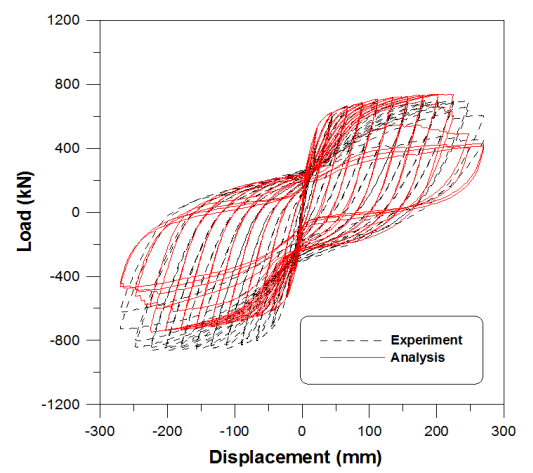
이와 같이 비선형 지진해석을 위해서 사용된 지진파를 Fig. 9에 나타내었다.

구조물의 비선형응답은 운동방정식의 점층 증가방식의 수치적분에 의하여 구해지며 주로 직접적분법이 사용되고 있다. 이 연구에서는 비선형 관계로 나타나는 동적 증분 평형방정식은 Hilber-Hughes-Taylor (HHT) 법²⁰⁾에 의한 시간에 대한 수치적분과정과 수렴에 도달하기 위한 반복계산과정을 거침으로써 해를 구하였다.

HHT 법은 기존의 Newmark법이 갖고 있는 단점인 수치적인 감쇠효과를 유도할 때 발생하는 정확도의 감소를 보완한



(a) S-CHT-80³⁾



(b) S-PRHT-120⁴⁾

Fig. 7 Comparison of results from the experimental results

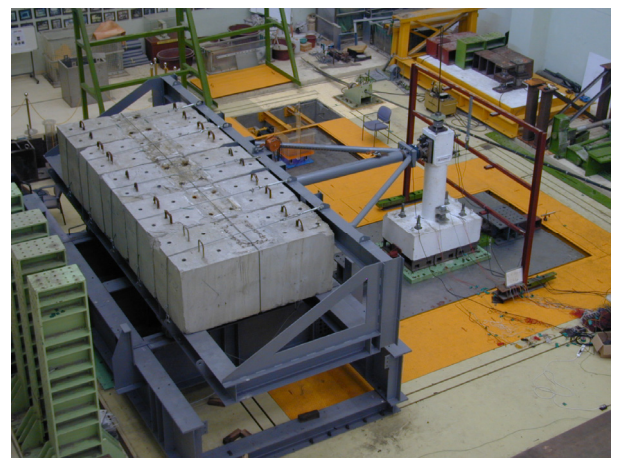


Fig. 8 Sample test setup¹⁹⁾

해석방법으로서 Hughes에 의해 그 수렴성과 안정성이 검증되었다.²¹⁾

교각 실험체의 고유진동수를 측정된 해석결과를 비교하여 Table 2에 나타내었으며 이때 감쇠는 3%로 하여 산정하였다. 고유진동수는 비교·검증을 위한 기존 중공 철근콘크리트 교각 실험체, 물량저감 중공 철근콘크리트 교각 실험

체, 그리고 내측 횡철근의 감축 여부를 변수로 하는 물량저 감중공 철근콘크리트 교각 실험체의 비탄성 동적거동 특성을 전반적으로 잘 나타내고 있음이 확인되었다.

비선형 지진해석 결과에 의한 변위와 하중의 이력관계를

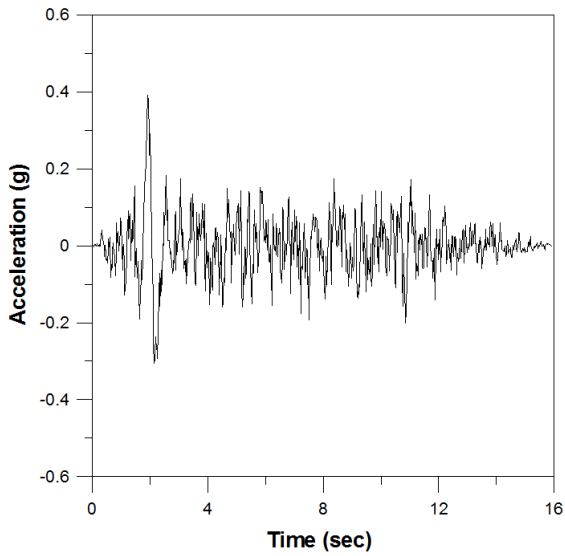


Fig. 9 Artificial ground acceleration¹⁹⁾

Table 2 Properties of test specimens

Specimen	Natural frequency (Hz)
S-CHC-80	2.97661
S-CHT-80	2.86529
S-CHNT-80	2.96676
S-PRHC-80	2.52879
S-PRHT-80	2.49908
S-PRHT-120	2.52322

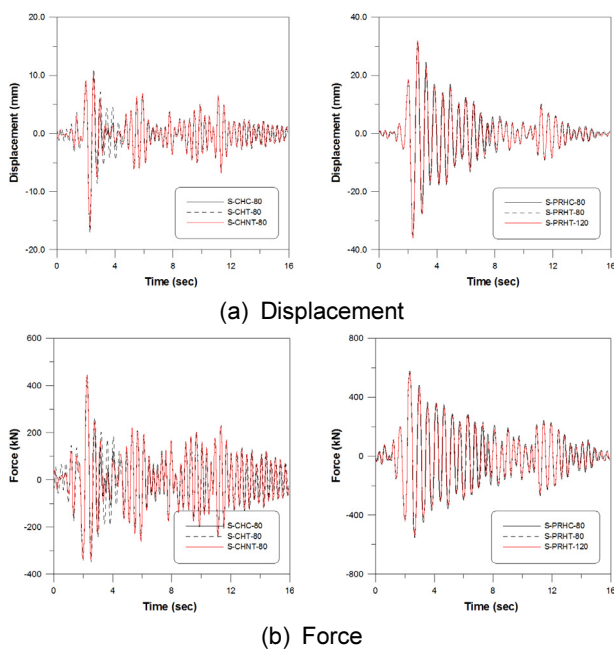


Fig. 10 Response for specimens (PGA 0.154 g)

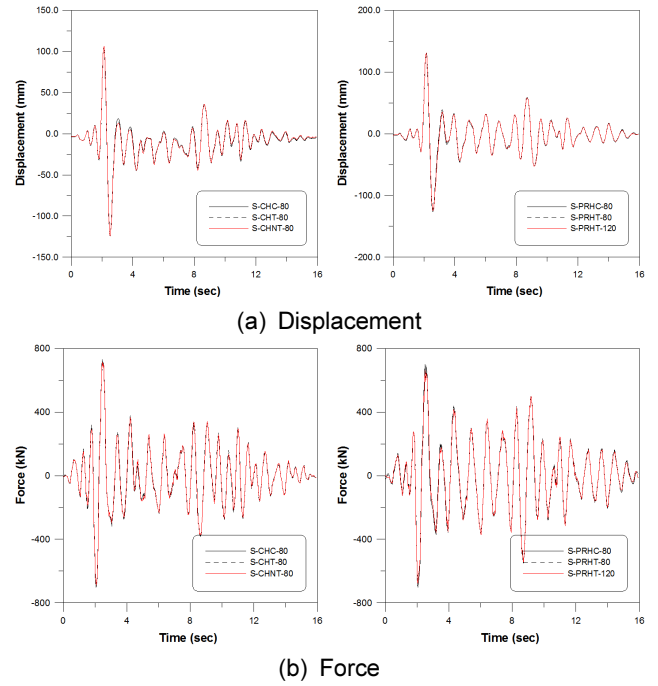
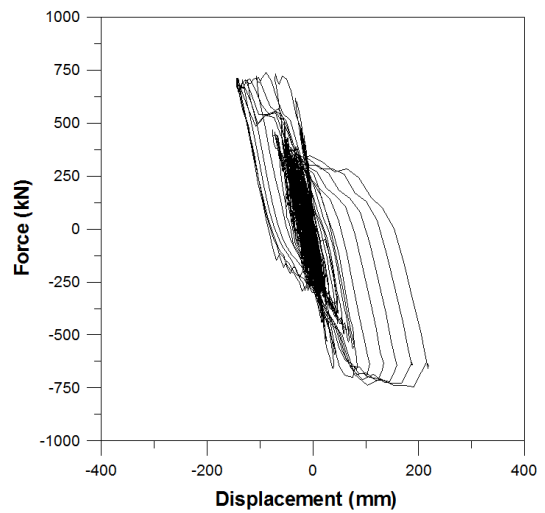
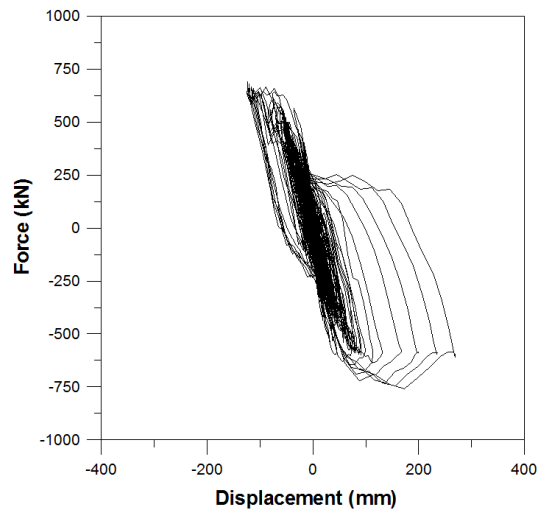


Fig. 11 Response for specimens (PGA 0.5 g)



(a) S-CHT-80



(b) S-PRHT-120

Fig. 12 Restoring force for specimens

관련 실험체별로 비교하여 Fig. 10과 11에 나타내고 있으며 현장타설 및 조립식 물량저감 중공 철근콘크리트 교각구조의 전체적인 응답특성을 잘 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한 해석결과는 개발된 물량저감 중공 철근콘크리트 교각이 기존 중공 철근콘크리트 교각과 변위와 하중의 주기 및 전체적인 응답특성이 유사함을 확인 할 수 있다.

각 실험체의 복원력 해석결과를 나타내는 Fig. 12는 선행 연구의 준정적 실험의 하중-변위 결과를 나타내는 Fig. 4와 거의 유사한 결과를 보이고 있으며 주철근의 항복 이후에 잔류변형이 크게 발생하는 등의 비선형 거동특성을 잘 나타내고 있다. 이를 통해 개발된 현장타설 및 조립식 물량저감 중공 철근콘크리트 교각은 기존 중공 철근콘크리트 교각과 강도, 연성, 에너지 소산능력 등의 면에서 동등한 성능을 보임과 동시에 유사한 동적거동 특성을 갖고 있음이 확인되었다.

4. 현장타설 및 조립식 물량저감 중공 철근콘크리트 교각의 내진성능평가

4.1 개요

현재 철근콘크리트 교각의 설계는 한계상태설계(Limit State Design)을 도입하여 사용하고 있으며 이를 기본으로 성능기반설계(Performance Based Design)로 선진화하는 과정에 있다. 이를 위해 요구되는 성능기준에 적합한 구조물을 설계하기 위한 기반기술의 개발을 위한 노력 등이 활발히 이루어지고 있다.

성능기반 내진설계는 구조물이 예측 가능한 내진성능을 확보하고 규정된 성능목표를 달성할 수 있도록 하는데 필요한 해석과 설계절차를 포괄하고 있는 설계 방법이다. 즉 예상되는 지진하중에 대하여 주어진 조건에서 허용할 수 있는 적절한 피해정도 혹은 에너지 흡수정도를 미리 설정하고 이

를 달성하도록 하는 설계법이다.²²⁾

이러한 성능기반 내진설계 체제에서는 손상상태의 정량화가 필수적이며 이는 확장된 지진손상 평가법¹⁴⁾을 통해서 얻을 수 있다. 손상지수는 비선형 유한요소해석에서 필연적으로 계산되는 가우스 적분점에서의 변형률을 이용하여 해석단계별로 직접 산정할 수 있으며 철근과 콘크리트의 극한 변형률에 근거한 파괴기준을 근거로 하고 있다. 이때 손상상태는 한 개 또는 그 이상의 한계상태에 의해 결정되고 각각은 성능수준을 규정할 수 있다.

완전기능 수준은 손상이 거의 발생하지 않아 보수가 요구되지 않는 상태이며 기능수행 수준은 경미한 손상이 발생하여 보수가 필요한 상태이다. 그리고 붕괴방지 수준은 심각한 손상이 발생하여 부분 또는 전체적인 보수·보강이 필요한 상태를 의미한다.

이 연구에서는 기존의 손상지수를 이용한 내진성능평가 기법¹⁵⁾을 확장하고 적용하여 개발된 현장타설 및 조립식 물량저감 중공 철근콘크리트 교각의 내진성능 평가를 가능하도록 하였다.

4.2 손상지수를 이용한 내진성능평가

입력지진파에 따른 손상지수의 변화를 성능수준과 함께 비교하여 Table 3에 나타내었고 이를 통해 현장타설 및 조립식 물량저감 중공 철근콘크리트 교각실험체의 내진성능평가를 가능하게 하였다.

Fig. 13과 같이 기존 중공 철근콘크리트 교각 실험체(S-CHC-80), 물량저감 중공 철근콘크리트 교각 실험체(S-CHT-80), 그리고 내측 횡철근의 감축 여부를 변수로 하는 물량저감 중공 철근콘크리트 교각 실험체(S-CHNT-80) 모두 유사한 손상진전을 보여주고 있으며 인공지진파에 대해 3가지 경우 모두 충분한 내진성능을 나타내고 있음을 확인

Table 3 Comparative evaluation of progressive damage

Input Acc. (g)	S-CHC-80		S-CHT-80		S-CHNT-80		S-PRHC-80		S-PRHT-80		S-PRHT-120	
	D.I.	P.L.	D.I.	P.L.	D.I.	P.L.	D.I.	P.L.	D.I.	P.L.	D.I.	P.L.
0.0627	0.01	●	0.01	●	0.01	●	0.02	●	0.02	●	0.02	●
0.0803	0.02	●	0.01	●	0.02	●	0.02	●	0.02	●	0.02	●
0.11	0.02	●	0.03	●	0.02	●	0.04	●	0.04	●	0.04	●
0.154	0.04	●	0.04	●	0.04	●	0.10	●	0.10	●	0.10	●
0.22	0.08	●	0.07	●	0.07	●	0.21	◎	0.22	◎	0.23	◎
0.3	0.18	◎	0.21	◎	0.17	◎	0.26	◎	0.23	◎	0.24	◎
0.4	0.30	◎	0.38	◎	0.35	◎	0.27	◎	0.27	◎	0.26	◎
0.5	0.34	◎	0.39	◎	0.38	◎	0.31	◎	0.35	◎	0.34	◎
0.6	0.37	◎	0.45	○	0.42	○	0.37	◎	0.39	◎	0.42	○
0.7	0.42	○	0.49	○	0.52	○	0.43	○	0.46	○	0.42	○
0.8	0.49	○	0.54	○	0.52	○	0.48	○	0.53	○	0.47	○
0.9	0.57	○	0.63	○	0.59	○	0.52	○	0.56	○	0.54	○

(Note) Performance level: Fully operational - ●, Delayed operational - ◎, Stability - ○

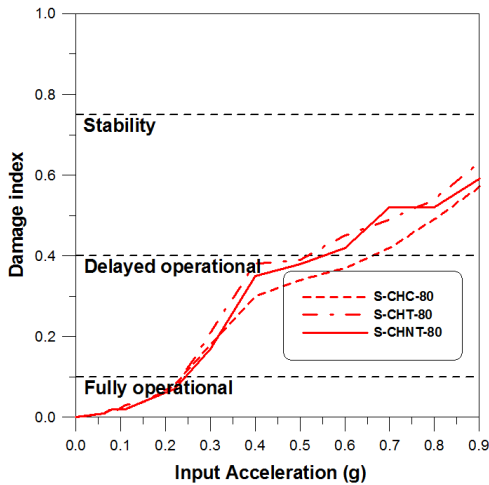


Fig. 13 Assessment of performance level for hollow cast-in-place bridge column

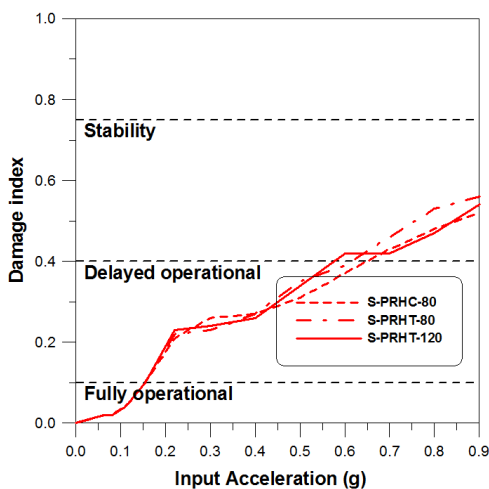


Fig. 14 Assessment of performance level for hollow precast bridge column

할 수 있다.

또한 Fig. 14와 같이 기존 조립식 중공 철근콘크리트 교각 실험체(S-PRHC-80), 조립식 물량저감 중공 철근콘크리트 교각 실험체(S-PRHT-80), 그리고 내측 횡철근의 감축 여부를 변수로 하는 조립식 물량저감 중공 철근콘크리트 교각 실험체(S-PRHT-120) 모두 유사한 손상진전과 충분한 내진성능을 나타내고 있음을 알 수 있다.

현장타설 물량저감 중공 철근콘크리트 교각의 비선형 지진해석 결과의 입력지진파에 따른 손상지수 값을 확인해보면 0.154 g에서 S-CHC-80 실험체는 0.04, S-CHT-80 실험체는 0.04, S-CHNT-80 실험체는 0.04이다. 0.5 g에서 S-CHC-80 실험체는 0.34, S-CHT-80 실험체는 0.39, S-CHNT-80 실험체는 0.38이다. 그리고 0.9 g에서 S-CHC-80 실험체는 0.57, S-CHT-80 실험체는 0.63, S-CHNT-80 실험체는 0.59이다. 즉 개발된 물량저감 철근상세를 갖는 S-CHT-80 실험체 및 S-CHNT-80 실험체는 기존 철근상세를 갖는 S-CHC-80 실험체와 동일한 입력지진파에서 손상이 거의 유사함을 확인할 수 있다.

조립식 물량저감 중공 철근콘크리트 교각의 비선형 지진해석 결과의 입력지진파에 따른 손상지수 값을 확인해보면 0.154 g에서 S-PRHC-80 실험체는 0.10, S-PRHT-80 실험체는 0.10, S-PRHT-120 실험체는 0.10이다. 0.5 g에서 S-PRHC-80 실험체는 0.31, S-PRHT-80 실험체는 0.35, S-PRHT-120 실험체는 0.34이다. 그리고 0.9 g에서 S-PRHC-80 실험체는 0.52, S-PRHT-80 실험체는 0.56, S-PRHT-120 실험체는 0.54이다. 즉 개발된 물량저감 철근상세를 갖는 S-PRHT-80 실험체 및 S-PRHT-120 실험체는 기존 철근상세를 갖는 S-PRHC-80 실험체와 동일한 입력지진파에서 손상이 거의 유사함을 확인할 수 있다.

이 해석결과에 나타난 손상지수의 값을 성능평가 기법으로 표현하면, 0.154 g에서는 완전기능 수준으로 손상이 거의 발생하지 않아 보수가 요구되지 않는 상태이다. 0.5 g에서는 기능수행 수준으로 경미한 손상이 발생하여 보수가 필요한 상태이다. 그리고 0.9 g에서는 붕괴방지 수준으로 심각한 손상이 발생하여 부분 또는 전체적인 보수 및 보강이 필요한 상태를 의미한다.

일련의 해석결과로부터 이 연구에서 제안하고 있는 방법은 지진하중에 의한 현장타설 및 조립식 물량저감 중공 철근콘크리트 교각의 비탄성 이력거동을 적절히 평가하고 있으며, 해석적 방법에 의해 기존 중공 철근콘크리트 교각 및 개발된 물량저감 중공 철근콘크리트 교각의 내진성능평가 가능할 것으로 판단된다.

5. 결 론

이 연구에서는 개발된 현장타설 및 조립식 물량저감 중공 철근콘크리트 교각의 지진거동과 내진성능평가를 위한 해석기법과 모델을 제시하였고, 준정적 실험으로 검증된 실험체의 비선형 지진해석을 수행하였다. 비교·검토된 수치예제로부터 다음의 결론을 얻었다.

- 1) 실험적, 해석적 연구로부터 개발된 현장타설 및 조립식 물량저감 철근상세를 갖는 중공 철근콘크리트 교각은 설계된 값을 잘 반영하고 있으며 기존 철근세를 갖는 현장타설 및 조립식 중공 철근콘크리트 교각과 동등 이상의 소요성능을 갖고 있는 것으로 확인되었다.
- 2) 제안한 해석기법과 모델은 준정적 실험의 연구결과 최대하중에 대한 실험값/해석값의 평균과 변동계수는 0.96과 0.03이고, 변위연성도에 대한 실험값/해석값의 평균과 변동계수는 0.91과 0.06으로서 전반적으로 실험결과를 잘 평가하고 있음이 확인되었다.
- 3) 현장타설 및 조립식 물량저감 중공 철근콘크리트 교각 시스템의 지진응답을 정확하게 예측하기 위하여 국내 근단층지반운동에 대한 모델링에서 도출된 지반운동 중 근단층운동이 진행되는 방향에 직각인 경우의 비선형 지진해석을 수행하였다. 이때 지진하중의 지속시간 및 크기, 감쇠효과 등을 고려하였고, 이를 통해 전반

적인 동적 거동특성을 바르게 표현하고 있음이 확인되었다.

- 4) 현장타설 및 조립식 물량저감 중공 철근콘크리트 교각의 시공 상세에 따른 응답특성 및 지진손상을 제대로 평가함으로써 향후 물량저감 중공 철근콘크리트 교각 구조의 내진성능평가 및 설계 검토 등에 충분히 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 또한 합리적이고 경제성 있는 차세대 내진설계법의 개발 등에 유용하게 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

References

- Kim, T. H., Choi, J. H., Lee, J. H., and Shin, H. M., "Performance Assessment of Hollow RC Bridge Column Sections with Reinforcement Details for Material Quantity Reduction", *Magazine of Concrete Research*, Vol. 65, No. 21, 2013, pp. 1277-1292.
- Kim, T. H., Lee, J. H., and Shin, H. M., "Performance Assessment of Hollow Reinforced Concrete Bridge Columns with Triangular Reinforcement Details", *Magazine of Concrete Research*, Vol. 66, No. 16, 2014, pp. 809-824.
- Kim, T. H., Kim, H. Y., Lee, J. H., and Shin, H. M., "New Hollow RC Bridge Piers with Triangular Reinforcement Details", *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol. 20, No. 1, 2016, pp. 21-31.
- Kim, T. H., Park, D. K., Lee, J. H., and Shin, H. M., "Performance Assessment of Hollow Precast Segmental Bridge Columns with Reinforcement Details for Material Quantity Reduction", *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol. 20, No. 1, 2016, pp. 33-43.
- Chung, Y. S., Park, C. Y., Hong, H. K., Park, J. H., and Shim, C. S., "Shake Table Response and Analysis of RC Bridge Piers with Lap-spliced Steel under NFGM", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 20, No. 4, 2008, pp. 451-458.
- Kim, I. H., Sun, C. H., Lee, S. H., Park, K. S., and Seo, H. Y., "Seismic Behavior of Circular Sectional RC Bridge Columns with Various Lap-splice Lengths - An Experimental Study", *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol. 16, No. 6, 2012, pp. 47-56.
- Phan, V. T., *Near Fault (Near Field) Ground Motion Effects on Reinforced Concrete Bridge Columns*, Thesis, University of Nevada, Reno, August, 2005.
- Kim, J. H., Kim, J. K., "Modeling of Near Fault Ground Motion due to Moderate Magnitude Earthquakes in Stable Continental Regions", *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol. 10, No. 3, 2006, pp. 101-111.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport. *Korea Highway Bridge Design Code (Limit State Design Method)*, 2015.
- Korea Concrete Institute. *Concrete Structural Design Code*, 2012.
- AASHTO. *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications*, 6th Edition, 2012.
- Kim, T. H. and Shin, H. M., "Analytical Study on Discontinuous Displacement in Reinforced Concrete Column-Footing Joint under Earthquake", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 12, No. 6, 2000, pp. 83-90.
- Kim, T. H., Lee, S. C., and Shin, H. M., "Analytical Study on Fatigue Behavior of Reinforced Concrete Bridge Piers under Earthquake", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 13, No. 4, 2001, pp. 389-396.
- Kim, T. H., Lee, K. M., Chung, Y. S., and Shin, H. M., "Seismic Damage Assessment of Reinforced Concrete Bridge Columns", *Engineering Structures*, Vol. 27, No. 4, 2005, pp. 576-592.
- Kim, T. H., Kim, Y. J., Kang, H. T., and Shin, H. M., "Performance Assessment of Reinforced Concrete Bridge Columns Using a Damage Index", *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 34, No. 7, 2007, pp. 843-855.
- Kim, T. H., Lee, S. H., Lee, J. H., and Shin, H. M., "Performance Assessment of Solid Reinforced Concrete Columns with Triangular Reinforcement Details", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 28, No. 1, 2016, pp. 75-84.
- Taylor, R. L.. *FEAP - A Finite Element Analysis Program*, Version 7.2. Users Manual, Volume 1 and Volume 2. 2000.
- Mander, J. B., Priestley, M. J. N., and Park, R., "Theoretical Stress-strain Model for Confined Concrete", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 114, No. 8, 1988, pp. 1804-1826.
- Kim, T. H., Hong, H. K., Chung, Y. S., Shin, H. M., "Seismic Performance Assessment of Reinforced Concrete Bridge Columns with Lap Splices using Shaking Table Tests", *Magazine of Concrete Research*, Vol. 61, No. 9, 2009, pp. 705-719.
- Hilber, H. M., Hughes, T. J. R., and Taylor, R. L. "Improved Numerical Dissipation for Time Integration Algorithms in Structural Dynamics", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 5, 1977, pp. 282-292.
- Hughes, T. J. R. *The Finite Element Method*, Prentice-Hall, 1987.
- Applied Technology Council. *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings*, ATC-40 Report, Redwood City, California. 1996.

요약 이 연구는 지진하중을 받는 현장타설 및 조립식 물량저감 중공 철근콘크리트 교각의 내진성능을 파악하는데 그 목적이 있다. 개발된 물량저감 삼각망 철근상세는 경제적이고 합리적이며 공사기간을 단축할 수 있다. 정확하고 올바른 성능평가를 위하여 신뢰성 있는 비선형 유한요소해석 프로그램을 사용하였다. 이용된 해석기법은 조사된 중공 교각 실험체에 대하여 입력지진파에 따라 내진성능을 비교적 정확하게 예측하였다. 그 결과 개발된 삼각망 물량저감 철근상세는 기존 철근상세와 동등 이상의 소요성능을 보임을 확인하였다.

핵심용어 : 내진성능, 중공, 현장타설, 조립식, 교각, 삼각망 철근상세, 경제적, 해석기법