

물량저감 중공 철근콘크리트 교각의 성능평가를 위한 비선형 지진해석

Nonlinear Seismic Analysis for Performance Assessment of Hollow RC Bridge Columns with Reinforcement Details for Material Quantity Reduction

김태훈^{1)*} · 이승훈¹⁾

Kim, Tae Hoon^{1)*} · Lee, Seung Hoon¹⁾

¹⁾삼성물산(주) 건설부문 기술연구소

¹⁾Construction Technology Division, Samsung C&T Corporation

/ A B S T R A C T /

The purpose of this study is to investigate the seismic performance of hollow RC bridge columns with reinforcement details for material quantity reduction. The proposed reinforcement details provide economy, are rational and shorten the construction periods. The accuracy and objectivity of the assessment process can be enhanced by using a sophisticated nonlinear finite element analysis program. Solution of the equations of motion is obtained by numerical integration using Hilber-Hughes-Taylor (HHT) algorithm. The adopted numerical method gives a realistic prediction of seismic performance throughout the input ground motions for several test specimens investigated. As a result, the proposed reinforcement details for material quantity reduction develop equal performance to that required for existing reinforcement details.

Key words: Material quantity reduction, Hollow, Bridge columns, Seismic performance, Economy, Assessment process, Numerical method

1. 서론

이 연구는 경제성과 합리성을 갖는 중공 철근콘크리트 교각 시스템을 개발하기 위한 일련의 연구로서 중공단면 교각의 횡방향 철근을 외측 횡철근과 보강 횡철근에 의한 삼각 구도로 구성하여 내측 횡철근을 없애거나 줄인 중공교각 시스템[1-4]의 지진응답을 해석적으로 예측하고 내진성능을 평가하는데 그 목적이 있다. 개발된 물량저감 중공 철근콘크리트 교각은 경제성과 합리성을 고려한 새로운 형태의 철근 배근상세를 가지며 배근작업이 용이하고 급속시공이 가능한 특징 등을 갖고 있다.

교각에 대한 내진성능을 평가하기 위한 실험은 준정적실험, 유사동적실험, 그리고 진동대 실험이 있다. 국내에서 수행되어 온 교량의 교각에 대한 내진 실험은 주로 준정적 혹은 유사동적 실험으로 수행되어져 왔다[5,6].

중공 철근콘크리트 교각의 경우에는 국내에 있는 진동대 용량의 한계로 인해서 소형 축소모형의 경우에도 진동대 실험이 쉽게 이루어지기 힘든 여건이다. 따라서 개발된 물량저감 중공 철근콘크리트 교각 시스템의 진동대 실험에 관한 적절한 해석기법의 개발이 이루어진다면, 다양한 형태의 교각에 대한 비선형 지진해석을 실시하여 미처 다루지 못한 여러 형태의 교각들의 내진성능평가가 가능할 것이다.

교각의 내진거동에 대한 실험에서 지금까지 주로 지반 운동을 원역지진 지반가속도(far field ground motion)에 대해서 다루어 왔지만 최근에 근단층지반운동(near fault ground motion)의 영향에 대한 관심이 높아지고 있다. Northridge 지진(1994), Hyogo-ken Nanbu 지진(1995), Kocaeli 지진(1999), Duzce 지진(1999), Chi-Chi 지진(1999) 등의 경우 단층 근처 지역에서의 지반운동에서의 특징적인 모습들을 보여주고 있다. 이러한 운동은 밀집된 도심지역에서 발생할 경우에 심각한 손상을 유발함을 명확하게 보여주고 있다. 따라서 교각의 내진성능평가에서 사용하는 지반운동을 근단층지반운동에 대해서 검토할 필요가 있다[7].

*Corresponding author: Kim, Tae Hoon

E-mail: th1970.kim@samsung.com

(Received 1 May 2014 Revised 11 June 2014 Accepted 16 June 2014)

최근에 국내에서도 근단층지반운동에 대한 모델링이 수행되었는데 근단층지반운동은 큰 진폭의 장주기 속도 펄스를 갖는 특징을 갖고 있으며 일반적으로 진앙거리가 약 10 km 이내인 지역에서 관측되는 지진지반운동을 말한다. 근단층지반운동은 단층파열의 전파와 전단파의 전파가 서로 간섭을 일으켜 발생하며 근단층운동이 진행되는 방향에 평행인 경우와 직각인 경우로 구분된다[8].

이 연구에서는 국내에서 수행된 근단층지반운동에 대한 모델링에서도 출된 지반운동중 근단층운동이 진행되는 방향에 직각인 경우를 이용하여 물량저감 중공 철근콘크리트 교각의 비선형 지진해석을 수행하고 내진성능을 평가하였다.

2. 개발된 물량저감 중공 철근콘크리트 교각

개발된 물량저감 중공 철근콘크리트 교각 시스템은 Fig. 1과 같다. 축방향 외측으로 배근되는 외측 축방향철근과 축방향 내측으로 외측 축방향철근 사이에 위치하도록 배근되는 내측 축방향철근, 횡방향 외측 축방향철근 비싸므로 외측 축방향철근을 둘러 감으면서 배근되는 외측 횡철근과 횡방향으로 2분의 외측 축방향철근과 그 사이에 위치한 1분의 내측 축방향철근을 삼각구조로 연결하도록 배근되는 보강 횡철근을 특징으로 하고 있다. 또한, 철근을 배근하고 콘크리트 타설하면서 기초부를 시공하는 제1단계, 앞에서 기술한 중공교각의 철근 배근구조에 따라 중공부 철근을 배근하고 콘크리트를 타설하면서 중공부를 시공하는 제2단계, 철근을 배근하고 콘크리트를 타설하면서 코핑부를 시공하는 제3단계에 의한 시공방법을 갖고 있다 [1,3].

중래의 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 상당히 복잡한 단점을 갖고 있다.

물량저감 중공 철근콘크리트 교각은 기존 철근상세가 갖고 있는 문제점을 해결하고 경제성과 합리성을 동시에 만족시킬 수 있도록 개발되었다. 즉, 내·외측 축방향철근이 내측보다 외측에 상대적으로 더 많이 배근되어 기존의 배근구조보다 구조적으로 유리한 거동 특성을 나타낸다. 또한 외측 횡철근과 보강 횡철근의 안정적인 삼각 구조에 의한 구속 응력으로 콘크리트의 3축 구속을 실현할 수 있기 때문에 취성 파괴에 유리하게 저항할 수 있으며, 소성거동 능력에 미치는 영향이 미미한 내측 횡철근을 없애거나 줄일 수 있다.

이 연구의 목적인 지진하중을 받는 물량저감 중공 철근콘크리트 교각의 내진성능을 파악하기 위해서 Table 1에 나타난 것과 같은 선행 연구[3]의 교각 실험체를 선정하였으며 교각실험체의 모델 상세의 예는 Fig. 2와 같다. 이때 물량저감 중공 철근콘크리트 교각 실험체의 설계는 현행 도로교설계기준[9], 콘크리트구조기준[10], 그리고 AASHTO LRFD[11]를 근거로 하였으며 횡방향 철근량은 중공내부가 채워진 중실단면으로 가정하고

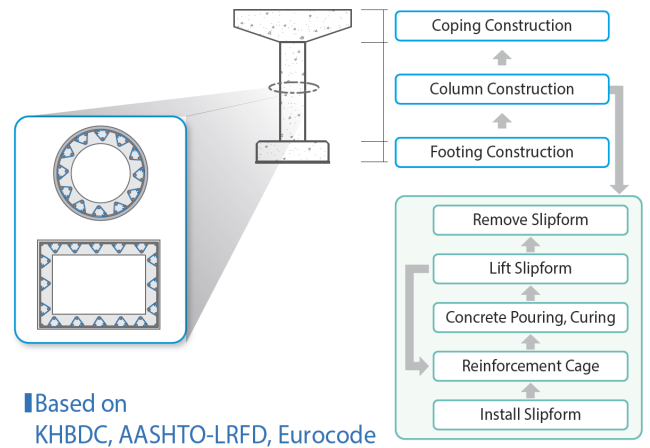


Fig. 1. Hollow RC bridge columns with reinforcement details for material quantity reduction

Table 1. Properties of test specimens

Specimen	Cylinder concrete strength (MPa)	Longitudinal reinforcement (D19)		Transverse reinforcement (D13)			Cross-tie (D13)		Axial force $P/f_{ck}A_g$
		f_{yl} (MPa)	ρ_l (%)	f_{yt} (MPa)	Space (mm)	Ratio (Compared to current code)	f_{yt} (MPa)	Space (mm)	
C-L	22.0	376.0	1.3	343.0	Outer @80, Inner @80	Outer 0.0047(49%), Inner 0.0047(49%)	343.0	18 @80	0.1
C-T		375.0		353.0	Outer @80, Inner @80	Outer 0.0047(49%), Inner 0.0047(49%)	353.0	12 @80	
C-NT		376.0		343.0	Outer @80, Inner @400	Outer 0.0047(49%), Inner 0.0009(10%)	343.0	12 @80	

Note) C-NT : Only outer lateral reinforcement

외측 횡철근만 고려하여 산정하였다. 그리고 부재의 제작과정을 통해서 시공오차의 원인이 될 수 있는 항목을 면밀히 검토하여 반영하였다.

교각 실험체는 비교-검증을 위하여 기준이 되는 기존 철근상세를 갖는 실험체 1기(C-L)와 개발된 물량저감 철근상세를 갖는 실험체 2기(C-T, C-NT)로 구성되어있다. 실험체 C-T와 C-NT는 내측 횡철근의 감축 여부를 변수로 최대간격 제한에 의해 400 mm로 결정하였다. 이때 모델의 단면은 외경이 1400 mm, 내경이 980 mm인 중공원형이고 교각의 하중 재하점까지의 높이는 4,900 mm 로서 휨과괴 거동을 유도하기 위하여 형상비를

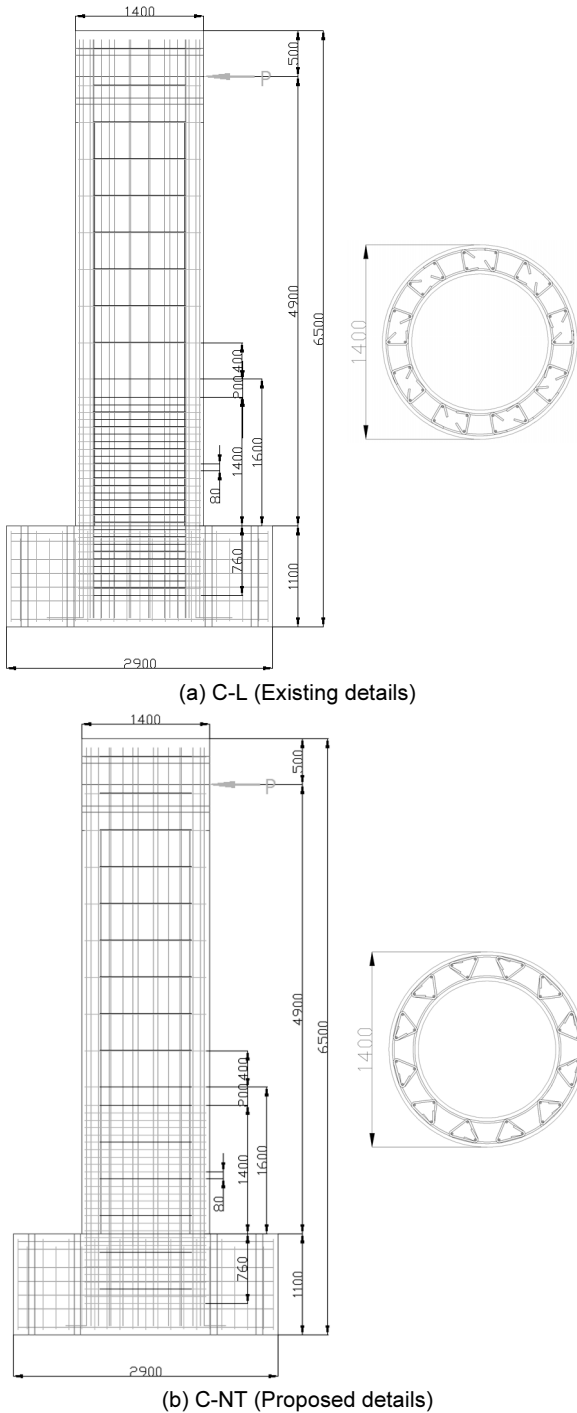


Fig. 2. Hollow circular column specimens (Unit: mm)

3.5로 결정하였으며 준정적 실험에 대한 세부적인 실험결과는 참고문헌[3]에 자세히 설명되어있으며 대표적인 연구결과를 Fig. 3에 나타내었다.

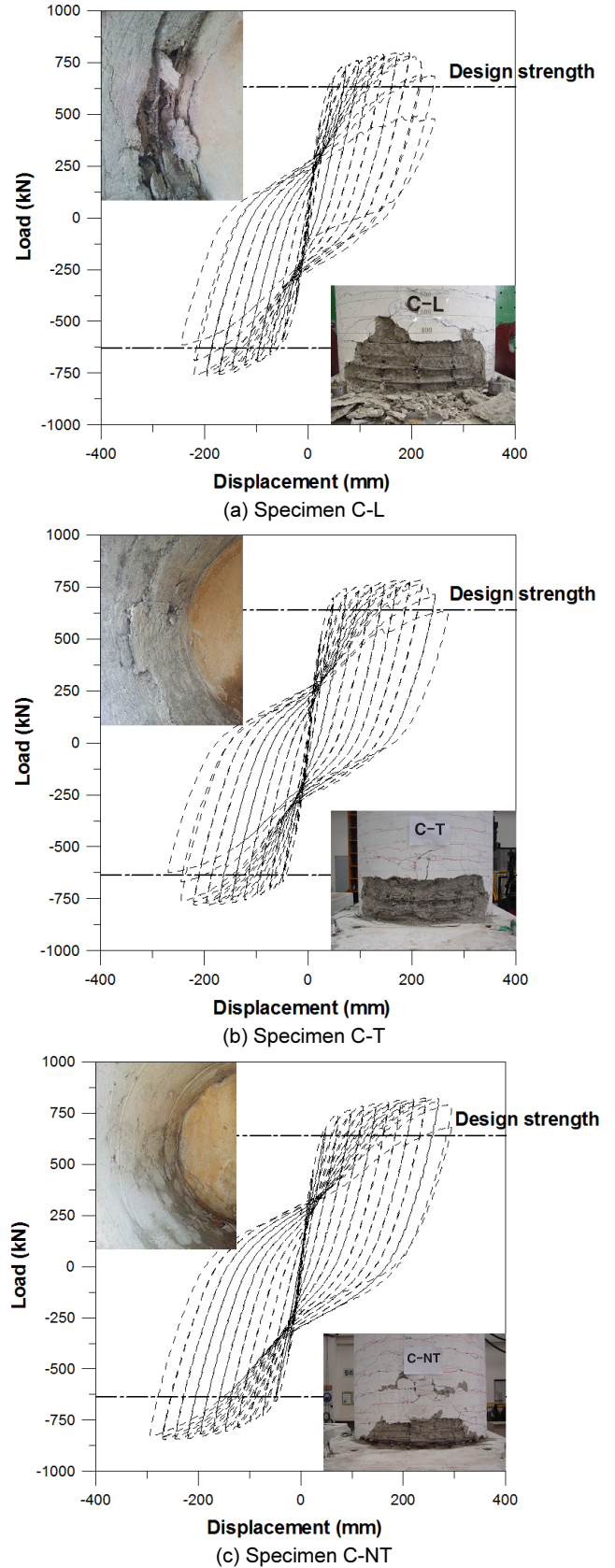


Fig. 3. Lateral load-displacement relationship

선행연구[3,4]를 통해 개발된 물량저감 중공 철근콘크리트 교각은 기존 중공 철근콘크리트 교각과 강도, 연성, 에너지 소산능력 등의 면에서 동등 이상의 성능을 보이고 있음이 확인되었다.

3. 물량저감 중공 철근콘크리트 교각의 지진해석

이 연구에서는 저자 등에 의하여 그 동안 개발된 철근콘크리트 평면응력 요소, 그리고 경계면요소 등[12-16]을 미국 버클리 대학의 Taylor가 개발한 범용 유한요소해석 프로그램인 FEAP ver. 7.2[17]에 이식하여 모듈화된 비선형 유한요소해석 프로그램 RCAHEST (Reinforced Concrete Analysis in Higher Evaluation System Technology)에 중공 단면의 구속 효과를 고려할 수 있도록 수정을 가하여 사용하였다(Fig. 4). 이때 철근콘크리트의 비선형 재료모델은 저자 등에 의하여 이미 발표된 재료모델 [12-16]을 그대로 적용하기로 하며 중공 단면의 구속효과는 콘크리트의 단면형상에 관계없이 적용할 수 있고, 축방향 철근 및 구속철근의 양, 구속철근의 항복강도 및 배근형태 등을 고려할 수 있도록 한 Mander 등[18]의 제안모델을 채택하여 수정하여 고려하였다.

횡방향철근에 의한 횡구속력은 유효구속력으로 결정되므로 단면형상과 횡방향철근량이 지배적인 요소가 된다. 그리고 동일한 횡방향철근량을 제공하더라도 설치간격, 배치형태, 갈고리 상세 등의 차이에 의해 유효구속력에 차이가 있게 된다. 이 연구에서는 다음과 같이 중공비(내경/외경)에 따라 횡구속 효과를 저감시키는 수정계수를 도입하여 중공 단면의 구속효과를 고려하였다[16].

$$k_c = k_{e1} \times k_{e2} \tag{1}$$

$$0 \leq \frac{D_i}{D_o} \leq 0.5, k_{e2} = 1 \tag{2}$$

$$0.5 < \frac{D_i}{D_o} < 1, k_{e2} = 2(1 - \frac{D_i}{D_o}) \tag{3}$$

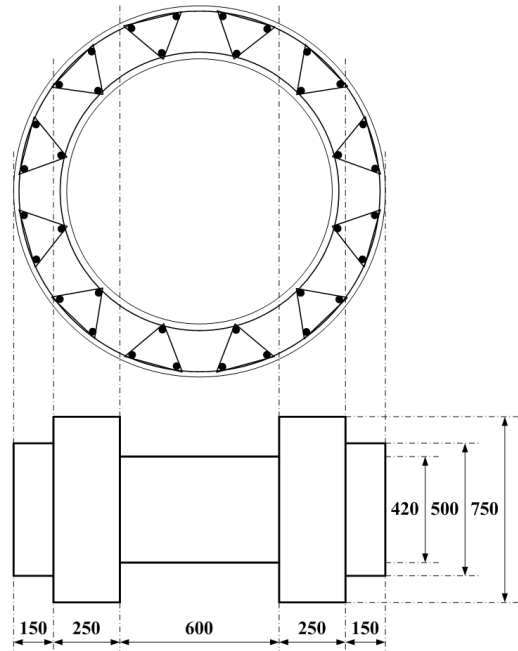
여기서, k_c 는 유효구속계수, k_{e1} 는 중실단면에서 계산되는 유효구속계수,

2D or 3D Spring element	4 nodes PSC shell element	2D or 3D Flexibility-based fiber beam-column element	4 nodes Elastic shell element
Joint element	FEAP		4 nodes RC shell element
Reinforcing or Prestressing bar element	Interface element	RC plane stress element	2D Elasto-plastic plane stress element

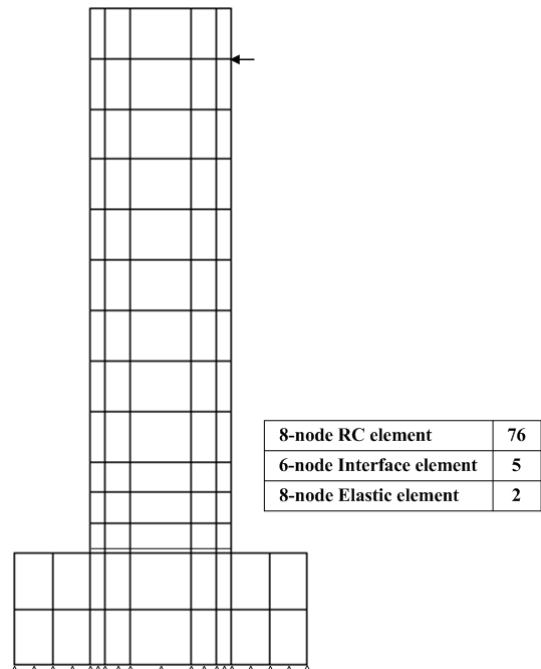
Fig. 4. RCAHEST nonlinear finite element analysis program

그리고 k_{e2} 는 중공비($\frac{D_i}{D_o}$)를 고려한 수정계수이다.

Fig. 5는 비선형 유한요소해석을 수행하기 위하여 요소 분할한 예이다. 중공단면 교각 실험체들의 유한요소해석을 위해서 등가환산단면을 이용하여 Fig. 5(a)와 같이 2차원 평면요소로 해석이 가능하도록 하였다. 등가환산단면은 중공단면 철근콘크리트 교각의 실제거동과 유사하도록 철근과 콘크리트의 단면적, 하중재하 방향의 단면 2차 모멘트를 같게 하여 유도하였다.



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

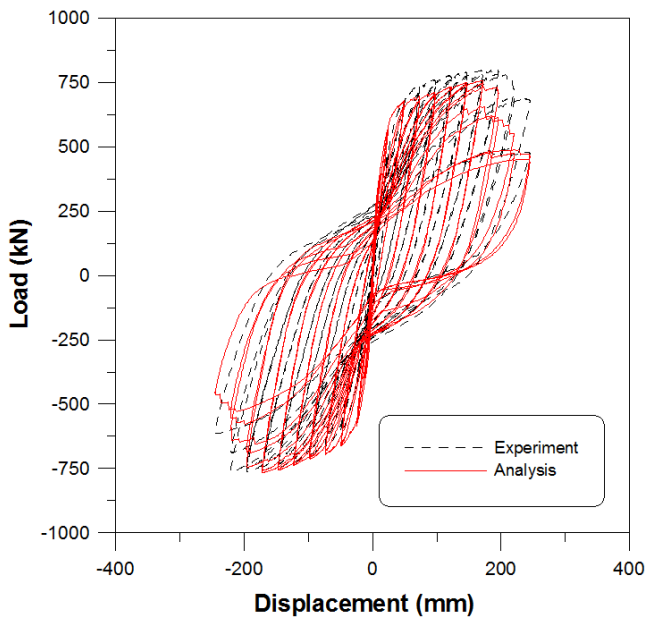


(b) Finite element mesh for analysis

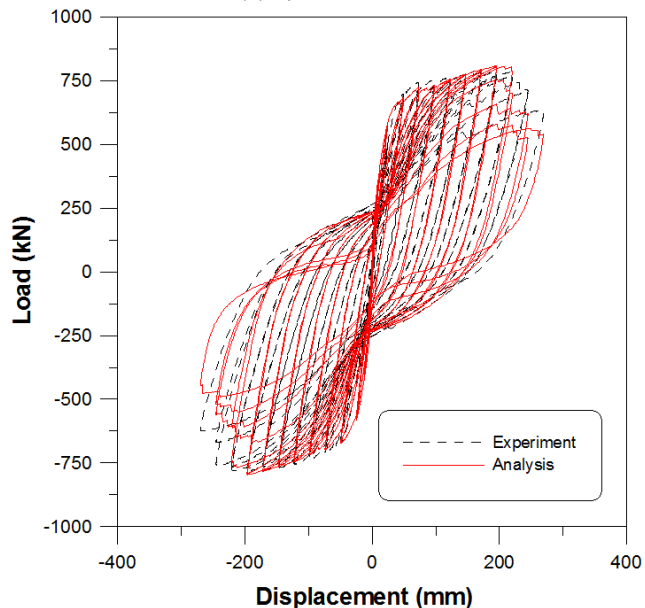
Fig. 5. Finite element model for circular specimens

이산균열개념에 근거한 경계면 요소는 기본적으로 요소의 평행 및 직각 방향으로만 응력이 발생하는 것으로 가정하고 있기 때문에 철근과 콘크리트의 재료모델을 그대로 적용할 수 있다. 그러나 경계면 요소의 변형은 인접한 두 부재간의 상대변위로부터 결정되기 때문에 요소의 응력-변형률 관계는 압축응력-압축변위 및 전단응력-전단미끄러짐의 관계로 정의된다. 이때 경계면 요소의 총 전단변위는 접합면에서의 미끄러짐과 국소적인 응력집중의 영향으로 인한 변위의 합으로 표현하였다. 그리고 사용된 유한요소망은 일반 탄성해석과의 수렴성 시험(convergence test) 결과 형상비(aspect ratio)에 의한 영향은 1.0% 미만이었으며 이는 콘크리트구조의 비선형해석에서 예상되는 오차에 비하여 매우 작은 것으로 나타나 그 타당성이 검증되었다.

Fig. 6은 이 연구의 해석모델을 적용한 유한요소해석 결과와 실험에 의



(a) Specimen C-L



(b) Specimen C-T

Fig. 6. Comparison of results from the experimental results

한 하중-변위 관계의 예를 나타내고 있으며 해석결과가 실험결과와 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 유한요소해석 결과에서 최대하중에 대한 실험값/해석값의 평균과 변동계수가 각각 1.01과 0.04로서, 최대하중의 평균값은 전반적으로 실험결과를 정확하게 평가하고 있으며 변동계수가 0.04에 불과하여 교각 실험체들의 비탄성 거동특성을 전반적으로 잘 평가하고 있는 것으로 판단된다. 그리고 변위연성도에 대한 실험값/해석값의 평균과 변동계수는 각각 0.89와 0.14로서, 변위연성도의 평균값은 실험결과 보다 다소 크게 평가하고 있으나 중공교각 실험체들의 내진성능을 포함한 거동특성을 비교적 정확하게 평가하고 있는 것으로 판단된다.

이 연구에서는 철근콘크리트 교각의 내진성능을 근단층지반운동에 대해서 평가하기 위해 축소모형을 제작하고 축력효과는 프리스트레스에 의해 구현하며 질량 효과는 별도의 질량모사 프레임(Fig. 7)을 제작하여 수행한 실험과 해석결과[5,15]를 근거로 물량저감 중공 철근콘크리트 교각의 비선형 지진해석을 수행하였다.

지반운동은 국내에서 중규모지진에 의한 근단층지반운동 모델을 수행하여 얻어진 결과를 이용하였고 단계별로 가속도 수준을 높이면서 파괴에 이르도록 설정하였다. 근단층지반운동으로 사용한 지반운동은 중규모지진에 의해서 생성된 것으로 0.0627g, 0.0803g, 0.11g, 0.154g, 0.22g, 0.3g, 0.4g, 0.5g, 0.6g, 0.7g, 0.8g, 0.9g까지 가진을 실시하였다. 비선형 지진해석을 위해서 사용된 지진파는 입력지진파의 최대가속도 크기를 조정하였으며, Fig. 8은 입력지진파를 나타내고 있다. 그리고 입력지진파에 대한 정규화 가속도 응답스펙트럼을 설계응답스펙트럼과 함께 Fig. 9에 나타내었다.

이 연구에서는 비선형 관계로 나타나는 동적 증분 평형방정식은 Hilber-Hughes-Taylor (HHT) 법[19]에 의한 시간에 대한 수치적분과정과 수렴에 도달하기 위한 반복계산과정을 거침으로써 해를 구하였다.

구조물의 비선형응답은 운동방정식의 점층 증가방식의 수치적분에 의하여 구해지며 주로 직접적분법이 사용되고 있다. 이러한 직접적분법 중 연구에 실제 많이 이용되는 해석법은 Newmark 법과 Hilber-Hughes-Taylor (HHT) 법이다. HHT 법은 Newmark 법이 갖고 있는 단점인 수치적인 감쇠효과를 유도할 때 발생하는 정확도의 감소를 보완한 해석방법으로서 Hughes에 의해 그 수렴성과 안정성이 검증되었다[20].

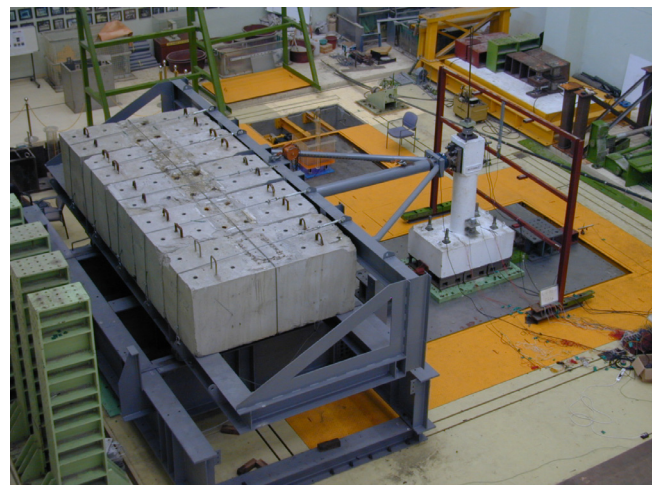


Fig. 7. Sample test setup[15]

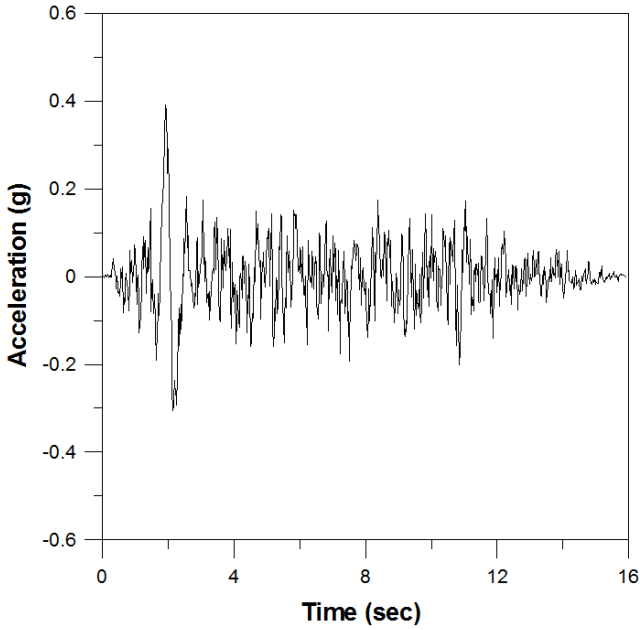


Fig. 8. Artificial ground acceleration

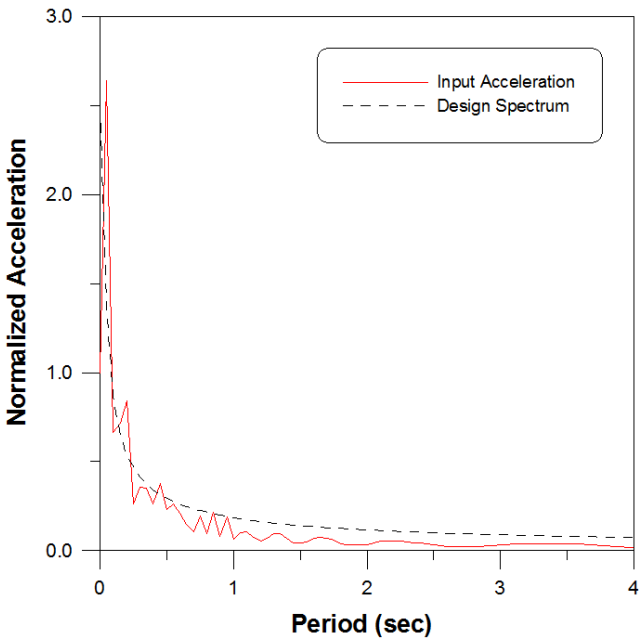


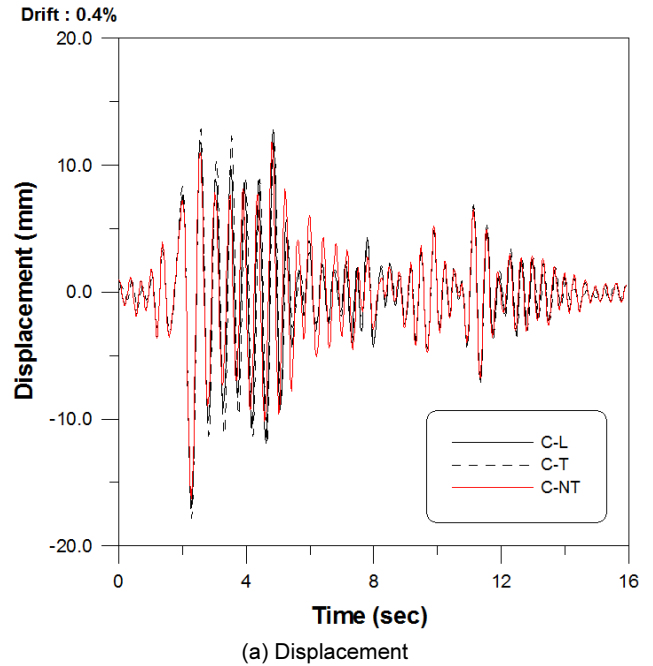
Fig. 9. Response spectrum

감쇠를 3%로 하고 교각 실험체의 고유진동수를 측정된 해석결과를 비교하여 Table 2에 나타내었다. 교각 실험체들의 고유진동수는 비교검증을 위한 기존 중공 철근콘크리트 교각 실험체, 물량저감 중공 철근콘크리트 교각 실험체, 그리고 내측 횡철근의 감축 여부를 변수로 하는 물량저감 중공 철근콘크리트 교각 실험체의 비탄성 동적거동 특성을 전반적으로 잘 나타내고 있으며 유사한 동적거동 특성을 갖고 있음이 확인되었다.

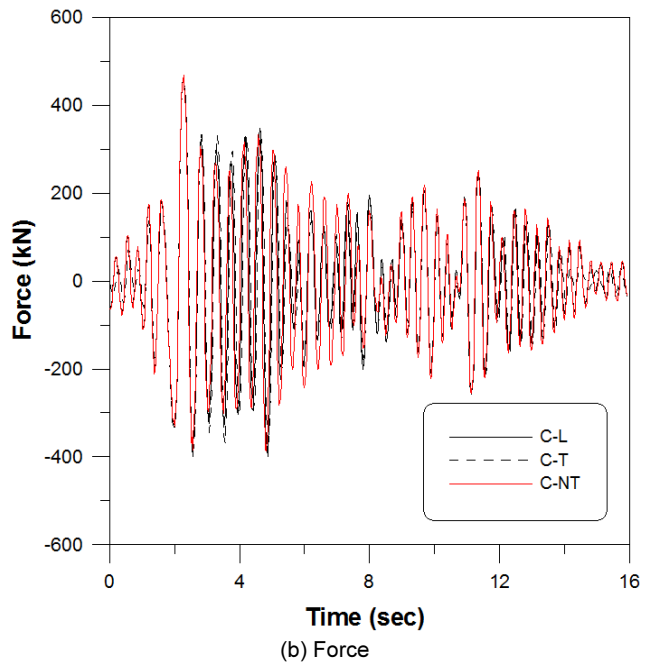
Fig. 10 ~ Fig. 12는 비선형 지진해석 결과에 의한 변위와 하중의 이력 관계를 관련 실험체별로 비교하여 나타내고 있으며 중공 철근콘크리트 교각구조의 지진하중에 대한 전체적인 응답특성을 전반적으로 정확하게 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한 해석결과는 개발된 물량저감 중공 철근콘크

Table 2. Natural frequency for specimens

Specimen	Natural frequency (Hz)
C-L	2.83162
C-T	2.71107
C-NT	2.81250



(a) Displacement



(b) Force

Fig. 10. Response for specimens (PGA 0.154g)

리트 교각이 기존 중공 철근콘크리트 교각과 변위와 하중의 주기 및 전체적인 응답특성이 유사함을 알 수 있다.

각 실험체의 복원력 해석결과를 나타내는 Fig. 13 ~ Fig. 15는 선형 연구의 준정적 실험의 하중 변위 결과(Fig. 3)와 거의 유사한 결과를 보이고

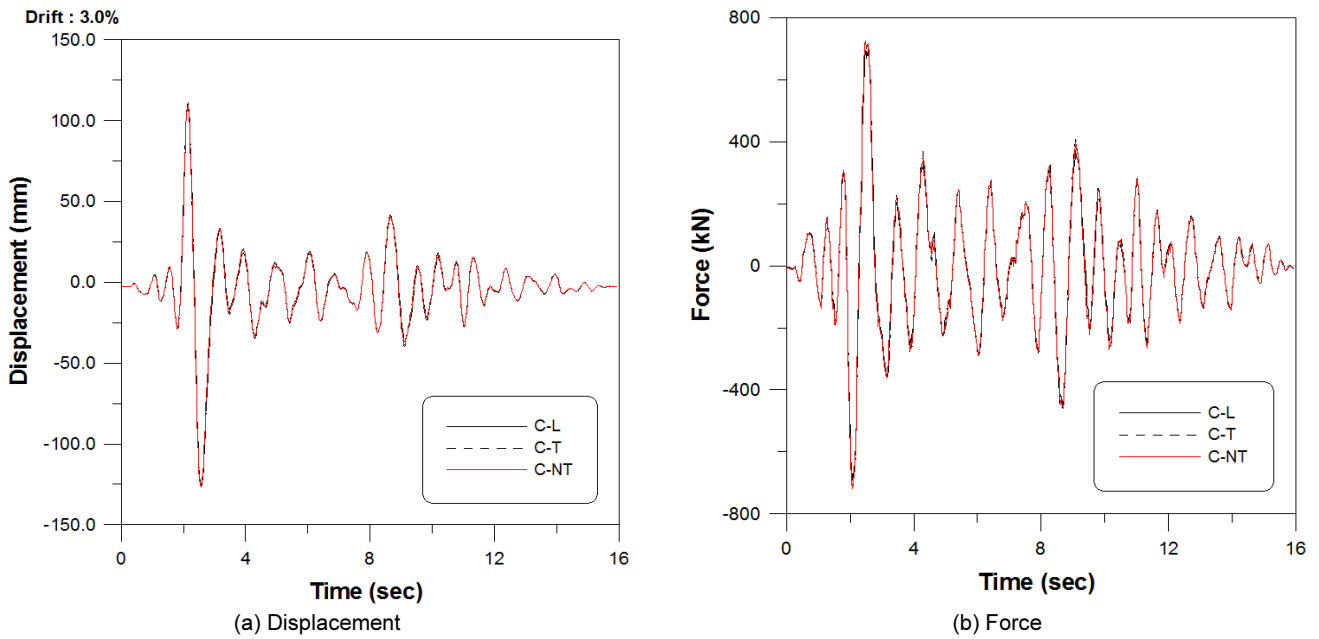


Fig. 11. Response for specimens (PGA 0.5g)

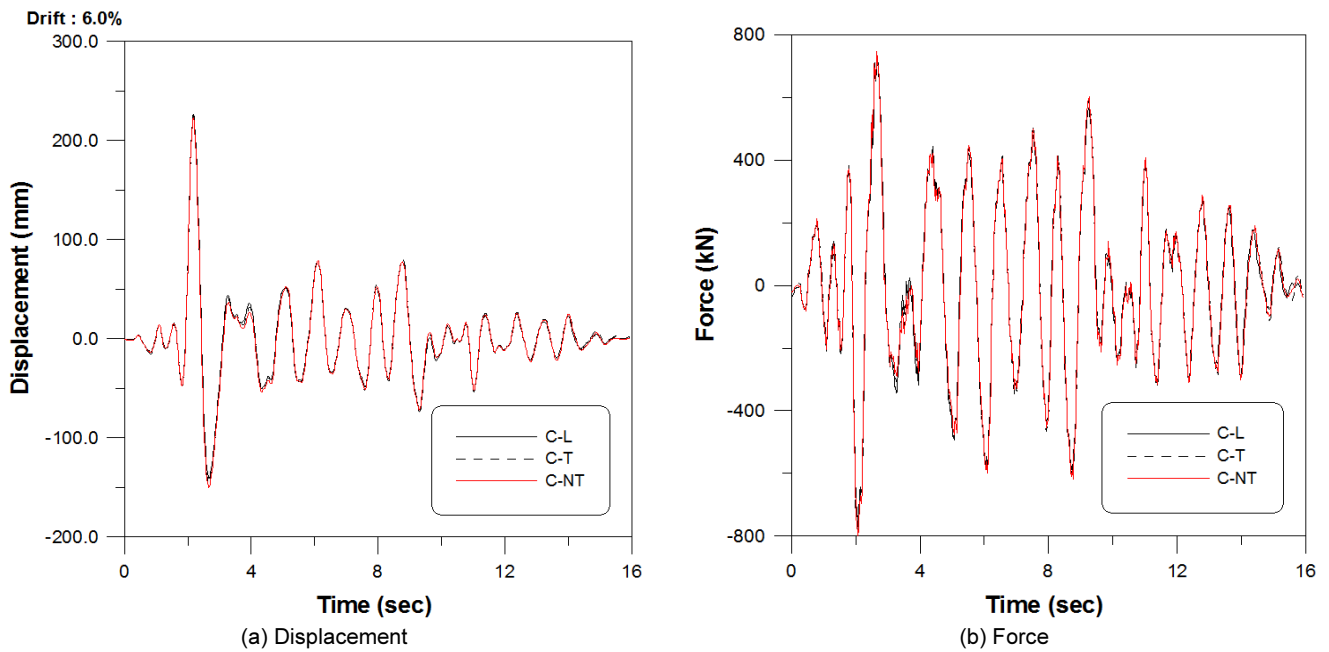


Fig. 12. Response for specimens (PGA 0.9g)

있으며 주철근의 항복 이후에 잔류변형이 크게 발생하는 등의 비선형 거동 특성을 잘 나타내고 있다. 이를 통해 개발된 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. 물량저감 중공 철근콘크리트 교각의 내진성능평가

최근 철근콘크리트 교각의 설계는 한계상태설계(Limit State Design)

이론을 도입하여 사용하고 있으며, 이를 기본으로 성능기반설계(Performance Based Design) 이론으로 전환하여 한층 선진화되는 과정에 있다. 또한 요구되는 성능기준에 적합한 구조물을 설계하기 위한 기반기술의 개발이 필요시 되고 있다.

성능기반 내진설계는 구조물이 예측 가능한 내진성능을 확보하고 규정된 성능목표를 달성할 수 있도록 하는데 필요한 해석과 설계절차를 포괄하고 있는 차세대 개념의 내진설계 방법이다. 즉 예상되는 지진하중에 대하여 주어진 조건에서 허용할 수 있는 적절한 피해정도 혹은 에너지 흡수정도를 미리 설정하고, 이를 달성하도록 하는 설계법이다[21].

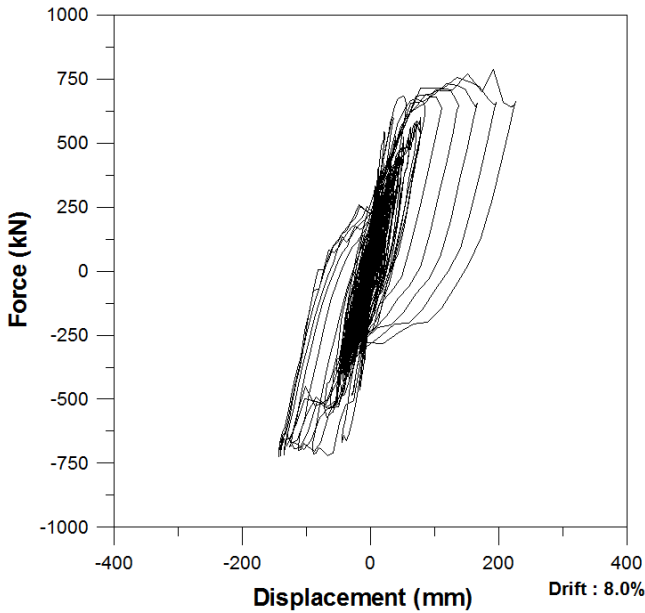


Fig. 13. Restoring force for specimen C-L

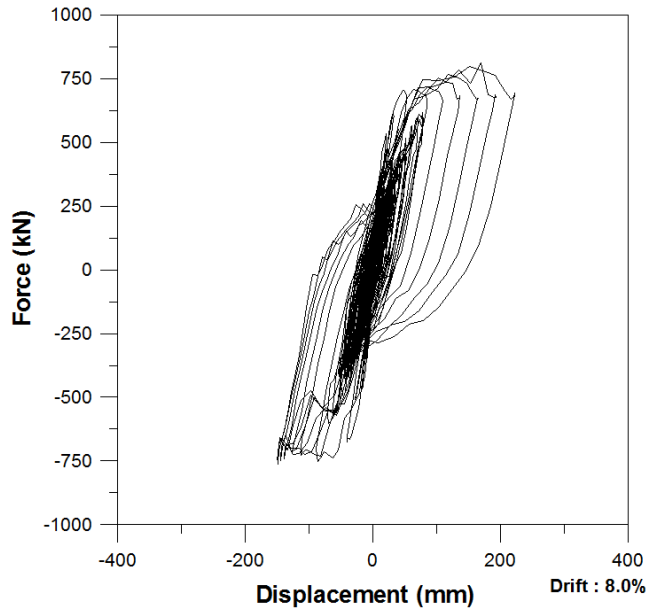


Fig. 15. Restoring force for specimen C-NT

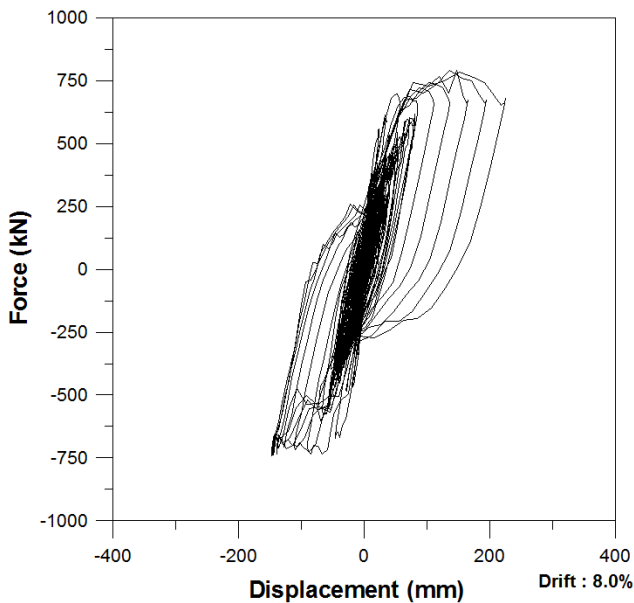


Fig. 14. Restoring force for specimen C-T

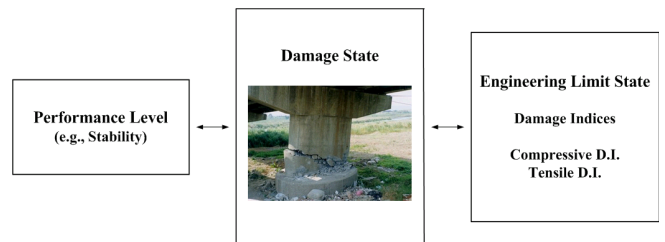


Fig. 16. Links between performance level, damage state and engineering limit state

이러한 성능기반 내진설계 체제는 손상상태의 정량화가 필수적이며 Fig. 16과 같이 확장된 지진손상 평가법[14]을 통해서 얻을 수 있다. 손상지수는 유한요소해석에서 필연적으로 계산되는 가우스 적분점에서의 변형률을 이용하여 해석단계별로 직접 산정할 수 있으며 콘크리트와 철근의 극한 변형률에 근거한 파괴기준을 토대로 하고 있다(Table 3). 이때 각 손상상태는 한 개 또는 그 이상의 한계상태에 의해 결정되고 각각은 성능수준을 규정할 수 있다(Table 4). 완전기능 수준은 손상이 거의 발생하지 않아 보수가 요구되지 않으며 기능수행 수준은 경미한 손상이 발생하여 보수가 필요한 상태이다. 그리고 붕괴방지 수준은 심각한 손상이 발생하여 부분 또는 전체적인 보수 및 보강이 필요한 상태를 의미한다.

이 연구에서는 위와 같이 기존의 손상지수를 이용한 내진성능평가기법

[14]을 확장, 적용하여 지진하중을 받는 물량저감 중공 철근콘크리트 교각의 내진성능 평가를 가능하도록 하였다.

Table 5는 입력지진파에 따른 손상지수의 변화를 성능수준과 함께 비교 검토함으로써 중공 철근콘크리트 교각실험체의 내진성능평가를 나타내고 있다. 기존 중공 철근콘크리트 교각 실험체(C-L), 물량저감 중공 철근콘크리트 교각 실험체(C-T), 그리고 내측 횡철근의 감축 여부를 변수로 하는 물량저감 중공 철근콘크리트 교각 실험체(C-NT) 모두 유사한 손상진전을 보여주고 있으며 인공지진파에 대해 3가지 경우 모두 충분한 내진성능을 나타내고 있음을 알 수 있다(Fig. 17).

비선형 지진해석 결과의 입력지진파에 따른 손상지수 값을 확인해보면 0.154g에서 C-L 실험체는 0.05, C-T 실험체는 0.04, C-NT 실험체는 0.04이다. 0.5g에서 C-L 실험체는 0.36, C-T 실험체는 0.39, C-NT 실험체는 0.39이다. 그리고 0.9g에서 C-L 실험체는 0.53, C-T 실험체는 0.55, C-NT 실험체는 0.61이다. 즉 개발된 물량저감 철근상세를 갖는 C-T 실험체 및 C-NT 실험체는 기존 철근상세를 갖는 C-L 실험체와 동일한 입력지진파에서 손상이 거의 유사함을 확인할 수 있다. 이 해석결과에 나타난 손상지수의 값을 성능평가 기법으로 표현하면, 0.154g에서는 완전기능 수준으로 손상이 거의 발생하지 않아 보수가 요구되지 않는 상태이다. 0.5g에서는 기능수행 수준으로 경미한 손상이 발생하여 보수가 필요한 상태이다. 0.9g에서는

Table 3. Failure criterion and damage indices

Item		Failure Criterion (ϵ_{cu} or ϵ_{tu})	Damage Index (DI)
Concrete	Compressive and Shear	$0.004 + \frac{1.4\rho_s f_{yh} \epsilon_{sm}}{f'_{cc}}$	$1 - ftg_c \left(\frac{2\epsilon_{cu} - \epsilon_{cs}}{2\epsilon_{cu}} \right)^2$
Steel	Tensile	0.10	$1.20 \left(\frac{\epsilon_{ts}}{2ftg_r \epsilon_{tu}} \right)^{0.67}$

* ρ_s = transverse confining steel ratio; f_{yh} = yield stress of the confining steel
 ϵ_{sm} = steel strain at maximum tensile stress; f'_{cc} = confined concrete compressive strength
 ftg_c = fatigue parameter for concrete; ftg_r = fatigue parameter for reinforcing bars
 ϵ_{cs} = compressive strain in analysis step; ϵ_{ts} = tensile strain in analysis step
 ϵ_{cu} = ultimate strain of concrete; ϵ_{tu} = ultimate strain of reinforcing bars

Table 4. Description of performance levels

Performance level	Service	Repair	Damage	
			State	Index
Fully operational	Full service	Limited epoxy injection	Hairline cracks	0.1
Delayed operational	Limited service	Epoxy injection Concrete patching	Open cracks Concrete spalling	0.4
Stability	Not useable	Replacement of damage section	Bar buckling/Fracture Core crushing	0.75

Table 5. Comparative evaluation of progressive damage for specimens

Input Acceleration (g)	C-L		C-T		C-NT	
	Damage Index	Performance Level	Damage Index	Performance Level	Damage Index	Performance Level
0.0627	0.01	Fully operational	0.00	Fully operational	0.01	Fully operational
0.0803	0.02	Fully operational	0.02	Fully operational	0.02	Fully operational
0.11	0.03	Fully operational	0.03	Fully operational	0.03	Fully operational
0.154	0.05	Fully operational	0.04	Fully operational	0.04	Fully operational
0.22	0.11	Delayed operational	0.16	Delayed operational	0.12	Delayed operational
0.3	0.31	Delayed operational	0.32	Delayed operational	0.28	Delayed operational
0.4	0.33	Delayed operational	0.34	Delayed operational	0.35	Delayed operational
0.5	0.36	Delayed operational	0.39	Delayed operational	0.39	Delayed operational
0.6	0.42	Stability	0.43	Stability	0.41	Stability
0.7	0.45	Stability	0.48	Stability	0.41	Stability
0.8	0.48	Stability	0.51	Stability	0.47	Stability
0.9	0.53	Stability	0.55	Stability	0.61	Stability

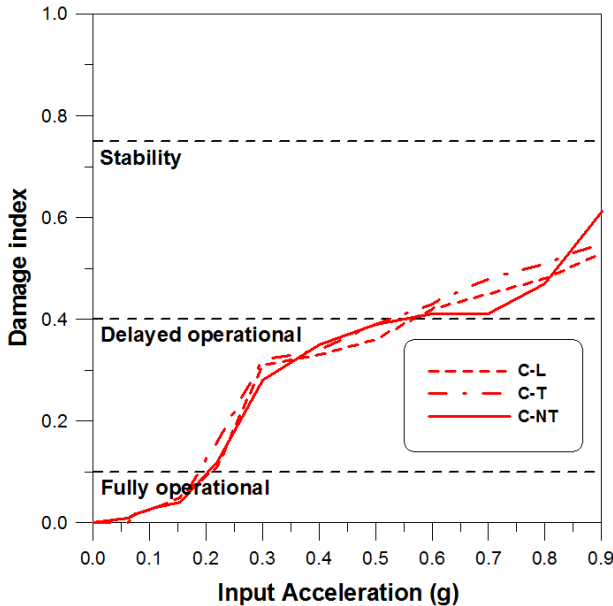


Fig. 17. Assessment of performance level for specimens

붕괴방지 수준으로 심각한 손상이 발생하여 부분 또는 전체적인 보수 및 보강이 필요한 상태를 의미한다.

일련의 해석결과로부터 이 연구에서 제안하고 있는 방법은 지진하중에 의한 물량저감 중공 철근콘크리트 교각의 비탄성 이력거동을 적절히 평가하고 있으며, 개발된 철근콘크리트 구조물의 비선형 유한요소해석 프로그램(RCAHEST)을 이용함으로써, 해석적 방법에 의한 신설 또는 기존 중공 철근콘크리트 교각 및 개발된 물량저감 중공 철근콘크리트 교각의 내진성능평가가 가능할 것으로 판단된다.

5. 결론

이 연구에서는 물량저감 중공 철근콘크리트 교각의 지진거동과 내진성능평가를 위한 해석기법과 모델을 제시하였고 제안된 해석기법과 모델을 적용한 비선형 유한요소해석 프로그램을 사용하여, 준정적 실험으로 검증된 물량저감 중공 철근콘크리트 교각 실험체의 비선형 지진해석을 수행하였다. 비교-검토된 수치예제로부터 다음의 결론을 얻었다.

- 1) 실험적, 해석적 연구로부터 개발된 물량저감 철근상세를 갖는 중공 철근콘크리트 교각은 설계된 값을 잘 반영하고 있으며 기존 철근상세를 갖는 중공 철근콘크리트 교각과 동등 이상의 소요성능을 갖고 있는 것으로 확인되었다.
- 2) 제안한 해석기법과 모델은 준정적 실험의 연구결과 최대하중에 대한 실험값/해석값의 평균과 변동계수는 1.01과 0.04이고 변위연성도에 대한 실험값/해석값의 평균과 변동계수는 0.89과 0.14로서 전반적으로 실험 결과를 잘 평가하고 있음이 확인되었으며, 또한 지진하중을 받는 물량저감 중공 철근콘크리트 교각의 전반적인 동적 거동특성을 바르게 표현하고 있음이 입증되었다.
- 3) 지진하중의 지속시간 및 크기, 감쇠효과 등을 고려하여 물량저감 중공 철근콘크리트 교각 시스템의 지진응답을 비교적 정확하게 예측하였다.
- 4) 지진하중을 받는 물량저감 중공 철근콘크리트 교각의 시공 상세에 따른 응답특성 및 지진손상을 제대로 평가함으로써 향후 물량저감 중공 철근콘크리트 교각구조의 내진성능평가 및 설계검토 등에 충분히 활용될 수 있을 것이다. 또한 현행 내진설계 규정에 만족하지 않는 기존의 중공 철근콘크리트 교각에 대한 보수·보강의 판단 등에 사용될 수 있을 것으로 판단된다.
- 5) 교각 구조물의 동적 특성과 지진동의 동적 특성을 고려하여 내진설계에 반영시킴으로써, 유사시 피해를 최소화 시킬 수 있을 것으로 기대되며 성능기반 내진설계개념에 접목하여 비선형 유한요소해석을 이용한 합리적이고 경제성 있는 차세대 내진설계법의 개발 등에 유용하게 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

/ REFERENCES /

1. Kim TH, Lee JH, Shin HM, Development of hollow reinforced concrete bridge column sections with reinforcement details for material quantity reduction, Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, 2013;17(3):107-115.
2. Kim TH, Kim HY, Lee JH, Shin HM, Parametric study on hollow reinforced concrete bridge column sections with reinforcement details for material quantity reduction, Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, 2013;17(4):159-169.
3. Kim TH, Lee JH, Shin HM, Hollow reinforced concrete bridge column systems with reinforcement details for material quantity reduction: I. Development and verification, Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, 2014;18(1):1-8.
4. Kim TH, Kim HY, Lee JH, Shin HM, Hollow reinforced concrete bridge column systems with reinforcement details for material quantity reduction: I. Experiments and analyses, Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, 2014;18(1):9-18.
5. Chung YS, Park CY, Hong HK, Park JH, Shim CS, Shake table response and analysis of RC bridge piers with lap-spliced steel under NFGM, Journal of the Korea Concrete Institute, 2008;20(4):

- 451-458.
6. Kim IH, Sun CH, Lee SH, Park KS, Seo HY, Seismic behavior of circular sectional RC bridge columns with various lap-splice lengths - an experimental study -, Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, 2012;16(6):47-56.
7. Phan VT, Near Fault (Near Field) Ground Motion Effects on Reinforced Concrete Bridge Columns, Thesis, University of Nevada, Reno, c2005.
8. Kim JH, Kim JK, Modeling of near fault ground motion due to moderate magnitude earthquakes in stable continental regions, Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, 2006; 10(3):101-111.
9. Ministry of Construction and Transportation, Korea Highway Bridge Design Code, c2010.
10. Korea Concrete Institute, Concrete Structural Design Code, c2012.
11. AASHTO, AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 6th Edition, c2012.
12. Kim TH, Lee KM, Yoon CY, Shin HM, Inelastic behavior and ductility capacity of reinforced concrete bridge piers under earthquake, I: Theory and formulation, Journal of Structural Engineering, ASCE, 2003;129(9):1199-1207.
13. Kim TH, Lee KM, Chung YS, Shin HM, Seismic damage assessment of reinforced concrete bridge columns, Engineering Structures, 2005;27(4):576-592.
14. Kim TH, Kim YJ, Kang HT, Shin HM, Performance assessment of reinforced concrete bridge columns using a damage index, Canadian Journal of Civil Engineering, 2007;34(7):843-855.
15. Kim TH, Hong HK, Chung YS, Shin HM, Seismic performance assessment of reinforced concrete bridge columns with lap splices using shaking table tests, Magazine of Concrete Research, 2009; 61(9):705-719.
16. Cheon JH, Kim TH, Lee BJ, Lee JH, Shin HM, Inelastic behavior and ductility capacity of circular hollow reinforced concrete bridge piers under earthquake, Magazine of Concrete Research, 2012;64(10): 919-930.
17. Taylor RL, FEAP - A Finite Element Analysis Program, Version 7.2, Users Manual, Volume 1 and Volume 2, c2000.
18. Mander JB, Priestley MJN, Park R, Theoretical stress-strain model for confined concrete, Journal of Structural Engineering, ASCE, 1988;114(8):1804-1826.
19. Hilber HM, Hughes TJR, Taylor RL, Improved numerical dissipation for time integration algorithms in structural dynamics, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1977;5:282-292.
20. Hughes TJR, The Finite Element Method, Prentice-Hall, c1987.
21. Applied Technology Council, Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings, ATC-40 Report, Redwood City, California, c1996.