

전단거동이 우세한 기둥의 비선형 해석에 관한 연구

김익현^{1)*} · 선창호¹⁾ · 이종석¹⁾

¹⁾ 울산대학교 건설환경공학부

(2003년 12월 20일 원고접수, 2004년 5월 31일 심사완료)

Nonlinear Numerical Analysis for Shear Dominant RC Columns Subjected to Lateral Force

Ick-Hyun Kim¹⁾, Chang-Ho Sun¹⁾, and Jong-Seok Lee¹⁾

¹⁾ Dept. of Civil & Environmental Engineering, University of Ulsan, Ulsan, 680-749, Korea

(Received December 20, 2003, Accepted May 31, 2004)

ABSTRACT

Because of crack control by steel bars after cracking the material models for reinforced concrete(RC) differ from those for plain concrete(PL). The nonlinear behavior of columns subjected to lateral load was simulated with reasonable accuracy in 3D analysis by applying distinct material models for RC and PL zone subdivided properly on the section. The shear strain is confirmed to develop unstably with ununiform distribution in out-of-plane direction. And this tendency becomes stronger as the thickness of column member increases in out-of-plane direction. If this ununiformity in strain distribution is not taken into consideration the capacity and the deformability of columns in shear dominant failure are overestimated excessively in two dimensional analysis. By introducing equivalent softening model a behavior of columns can be predicted too in two dimensional analysis.

Keywords : RC columns, nonlinear behavior, shear failure, 3D analysis, softening model, zoning problem

1. 서 론

교량구조물의 본격적인 내진설계와 함께 수평력(지진하중)을 받는 기둥부재의 거동특성에 관한 많은 실험연구가 수행되고 있으나¹⁻³⁾ 실험을 통해 이를 모두 파악하기에는 현실적으로 어려움이 따른다. 따라서, 기둥을 포함한 부재의 비선형 거동특성을 예측하기 위하여 다양한 수치해석 기법이 개발되어 적용되고 있다. 철근콘크리트 부재는 콘크리트와 철근의 부착에 의하여 이들 상호간의 응력전달이 복잡하게 나타나고 또한 콘크리트의 균열 및 철근의 항복에 의하여 강한 비선형 거동특성이 나타나는 특징이 있다. 이러한 복잡한 거동특성을 비교적 정확하게 예측하기 위해서는 적절한 역학적모델(재료레벨 또는 부재레벨)과 해석모델링이 필요하다. 분산균열모델을 도입한 유한요소 해석은 RC 구조물의 전체적인 거동특성을 모사할 수 있는 가장 광범위하게 적용되는 해석방법 중의 하나이다.

3차원 영역에서의 유한요소해석은 구조물의 형상, 경계조건, 하중 및 재료특성 등을 실제와 유사하게 모델화 할

수 있어 구조물의 응답과 관련한 가장 유용한 정보를 제공한다. 전단벽이나 박스구조와 같이 응력 또는 변형률이 평면상태인 경우에는 2차원 영역에서 해석을 수행하여도 3차원 해석과 유사한 결과를 기대할 수 있다. 비교적 단면 크기가 작고 휨 거동이 우세한 기둥의 경우에도 2차원 영역에서의 해석은 실제 거동과 유사 결과를 준다^{4,5)}. 그러나 교량의 교각구조물과 같이 단면이 큰 기둥의 경우, 특히 전단거동이 우세한 경우에는 2차원 영역의 해석에서는 상당한 주의가 필요하게 된다. 하중을 받는 직각방향(면외방향)에 대해서 비교적 철근이 고르게 분포되는 보나 단면이 작은 기둥과 달리 교각과 같이 큰 기둥단면에서는 철근이 배근되지 않는 영역이 커서 철근과 콘크리트의 부착에 의한 응력 전달특성이 다르게 나타나게 된다. 만약, 이를 적절하게 모델화하지 않는다면 실제거동과 다르게 모사될 수 있기 때문이다. 이에 본 논문에서는 제원특성상 비교적 전단거동이 우세한 교각의 비선형 거동특성을 적절하게 모사하기 위한 3차원 해석적 기법에 대하여 기술하였으며 또한, 2차원 해석에서의 문제점에 대해서도 고찰하였다. 이를 위하여 면내방향에 대해서는 매우 유사한 특성을 지니지만 면외방향에 대해서는 각기 다른 단면치수를 갖는 3기의 축소모델을 제작하여 준정적재하실험을 수

* Corresponding author

Tel : 052-259-2278 Fax : 052-259-2629

E-mail : ickhyun@mail.ulsan.ac.kr

행하였다. 축소모델은 면내방향에 대해서 매우 유사한 특성을 지니고 있어 2차원 영역의 해석에서는 거의 동일하게 모델화되는 특성을 지니고 있다. 3차원 해석결과를 기본으로 하여 전단거동이 우세한 기둥의 역학적 파괴메커니즘의 특성도 함께 분석하였다.

2. 재료모델과 요소의 영역화 문제

2.1 재료모델

합리적 수준의 비선형 해석결과를 얻기 위해서는 적용하는 재료모델의 신뢰성이 관건이 된다. 본 해석에 적용된 RC의 구성모델은 콘크리트모델과 철근모델로 구성되며 이들의 응력-변형률의 관계는 균열을 포함하는 일정 크기 이상의 요소에서 평균적인 응력과 변형률의 관계로 주어진다. 콘크리트 모델은 균열유무에 따라 각기 다른 모델이 적용된다. 균열 발생 전에는 3차원 탄소성파괴모델⁽⁶⁾(EPF model; Elasto-Plastic continuum Fracture model)이 적용되지만 일단 균열이 발생하면 균열을 통한 응력 이완(stress release)이 일어나므로 3차원 구속효과는 무시할 만큼 작다고 가정하여 3차원의 분산균열모델(smearred crack model)로 전환된다⁽⁷⁾. 따라서, 균열발생 후의 3차원 공간상에서의 응력은 3개의 직교하는 2차원 평면대로 분할되고, 2차원 평면대로 투영된 균열을 따라 평면 구성모델을 적용하여 응력을 계산한 후 다시 3차원 공간에서의 응력으로 조합된다. 2차원 평면대의 분산균열모델은 압축에 대하여 탄소성손상모델(elasto-plastic and continuum damage model), 인장에 대해서는 인장 경화모델(tension stiffening model)⁽⁸⁾, 전단에 대해서는 접촉밀도 함수를 가정한 전단모델(contact density model)⁽⁹⁾로 구성되어 있다.

철근비가 충분한 RC부재의 경우, 인장력에 의하여 균열이 발생하더라도 철근이 아직 항복하지 않아 콘크리트와 철근사이의 부착특성에 의하여 균열면 주위의 콘크리트로 하중을 전달하게 된다. 따라서, 콘크리트의 평균인장응력은 급격하게 0(zero)로 떨어지지 않고 서서히 감소하게 된다. 본 연구에서는 Fig. 1로 표현되는 인장경화모델을 채용하였다⁽⁸⁾. 한편, 철근이 배근되지 않은 무근콘크리트의 경우에는 일단 균열이 발생하면 급격한 응력 감소를 나타내게 된다. 무근콘크리트의 이러한 인장연화특성은 식(1)로 표현되는 파괴에너지를 도입하여 특성을 나타낼 수 있다⁽¹⁰⁾.

$$G_f = w_c \int \sigma_t d\epsilon_t \quad (1)$$

여기서, σ_t 와 ϵ_t : 각각 균열에 수직인 평균응력, 평균변형률, w_c 는 균열 폭이다. G_f 는 파괴에너지로 골재의 최대치수와 깊은 관련이 있는 재료의 특성 값이다⁽¹¹⁾.

Fig. 2는 분산균열모델의 유한요소 해석에 있어서 요소 크기(l_r)를 식(1)의 균열 폭(w_c)에 대체하는 경우 요소 크기에 따른 무근콘크리트에서의 평균 인장응력-인장 변형률의 관계(인장연화; tension softening)를 나타내고 있다. 요소의 크기가 커짐에 따라 경화계수(c)의 값이 커져 응력 감소율이 증가하게 된다.

균열이 발생한 RC에서 전단응력의 전달 메커니즘은 균열면에서 콘크리트가 상호 접촉을 일으키는 면적과 깊은 상관관계가 있다. 이러한 접촉면적을 밀도함수를 도입하여 전단응력 전달메커니즘을 표현한 전단모델을 채용하였다⁽⁹⁾. 본 전단모델에서의 전단응력은 인장균열 폭(인장변형률)에 대한 전단변위비(전단변형률)로 표현된다. Fig. 3은 다양한 인장변형률에 대한 전단응력과 전단변형률의 관계를 보여준다. 인장모델에서와 유사하게 무근콘크리트에서는 전단응력의 전달능력이 크게 떨어져 연화현상을 나타내게 될 것이다. 균열면을 따른 전단응력의 전달 메커니즘에 대한 기존의 연구⁽¹³⁾를 살펴 보면 전단연화는 균열면을 따른 전단변위의 함수로 표현 가능하다. 본 연구에서는 원래의 Bujadham model⁽¹²⁾과 유사한 모델을 채용하였다. 즉, 전단변형률이 극한 값(본 연구에서는 0.0004)에 도달하면 전단

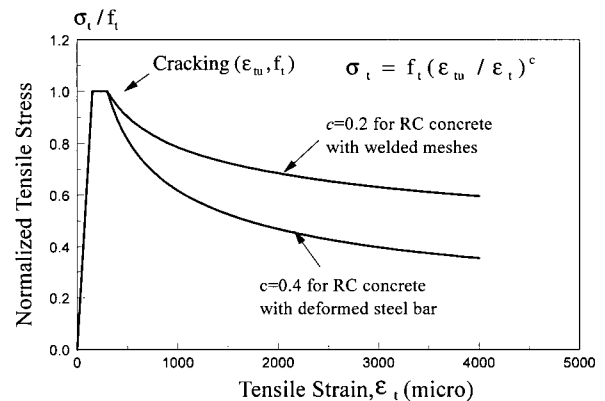


Fig. 1 Tensile stiffening model for RC zone

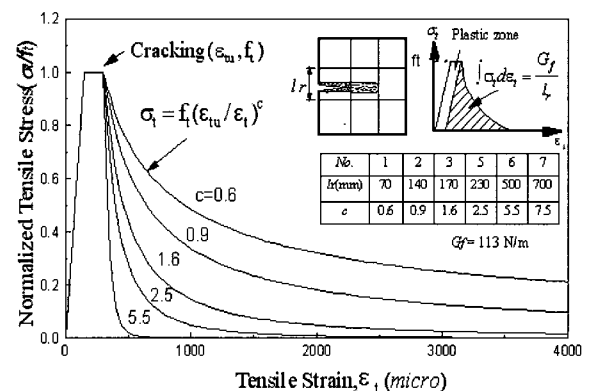


Fig. 2 Tensile stress-strain softening curve

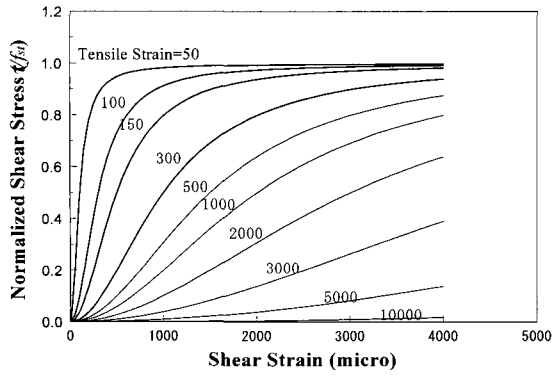


Fig. 3 Shear model for concrete in RC zone

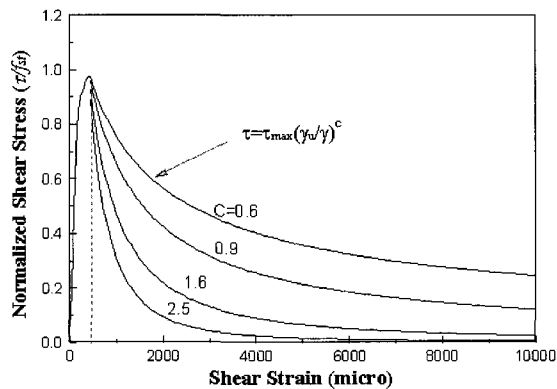


Fig. 4 Shear model for plain concrete ($\epsilon_t = 0.00005$, $\gamma_u = 0.0004$)

연화 현상이 나타나는 것으로 하였다. 전단에 대한 파괴에너지에 대한 연구는 아직 충분하게 수행되지 않은 상태에서 본 연구에서는 인장모델에서 적용되는 경화계수(c)를 동일하게 적용하였다. Fig. 4는 전단연화 모델의 한 예를 나타낸다.

2.2 RC 영역화 문제

위에서 기술한 바와 같이 철근콘크리트(RC)와 무근콘크리트(PL)의 응력-변형률의 관계는 균열 후 다른 특성을 나타내게 된다. 이는 RC의 경우 균열이 발생하더라도 철근과 콘크리트의 부착특성에 의하여 균열의 진전이 제어되기 때문이다. 철근이 배근된 부재가 RC영역의 응력-변형률의 특성(인장 및 전단 경화 특성)을 나타내기 위해서는 최소한의 철근비가 필요하게 된다. 이러한 최소철근비 이하에서는 RC와 PL의 중간적인 특성을 나타내게 될 것이다.

기둥의 경우 단면의 둘레에만 주철근이 배근되어 있어 주철근으로부터 멀리 떨어져 있는 단면 내부의 경우에는 주철근에 의하여 균열이 제어되지 않는다. 따라서, 기둥의 단면을 철근에 의하여 균열이 제어되는 RC영역(RC zone)과 제어되지 않는 PL영역(PL zone)으로 나누는 것이 필

요하게 된다. RC영역의 크기를 결정하는 간단한 방법의 하나는 식(2)와 같다^{13,14}. 이는 단면 중심에 1개의 주철근이 배근된 RC부재가 인장력을 받아 하나의 균열이 발생하는 경우 콘크리트가 부담하던 인장력이 균열면의 철근으로 전달되어 바로 항복이 발생하는 콘크리트의 단면적을 나타낸다. 만약, 부재의 단면적이 A_{cmax} 이상이면 균열 후 철근이 바로 항복하게 되어 균열단면 주위로 더 이상의 응력 전달이 이루어지지 않게 된다.

$$A_{cmax} = \frac{A_s \cdot f_y}{f_t} \quad (2)$$

여기서, A_{cmax} 는 부착특성이 기대되는 콘크리트의 최대단면적, A_s 는 철근의 단면적, f_y 는 철근의 항복강도, f_t 는 콘크리트의 균열강도이다.

식(2)는 기본적으로 철근과 콘크리트 사이의 부착특성이 저하되지 않는 상태에서는 유효하지만 실제 부재에서는 불충분한 피복두께에 의한 할렬균열이 발생하고 이러한 할렬균열은 횡철근에 의해서도 영향을 받기 때문에 보다 복잡한 문제가 된다. 따라서, RC영역의 크기는 식(2)에서 제안되는 것보다 다소 작을 것으로 예측된다.

3. RC 기둥 실험

3.1 시험체 상세

외형적 제원이 비교적 단주에 가까운 시험체 3기를 제작하여 수평정적 재하실험을 수행하였다. 시험체의 휨강도에 대한 전단강도비는 1.3 이하(Table 1의 capacity ratio)로 비교적 전단거동이 우세하다. 시험체의 재하방향(면내 방향)으로의 단면치수는 300 mm이고 기초상단에서 재하

Table 1 Specimen details

Description		T60	T40	T20
Dimension	Thickness(mm)	600	400	200
	Width(mm)	300		
	Effective depth d (mm)	270		
	Height a (mm)	800		
	Shear span ratio a/d	2.96		
Material strength	Con'c strength(MPa)	20		
	Yield strength(MPa)	293		
Longitudinal bars	Ratio(%)	1.69	2.11	2.96
Transverse bars	Space(mm)	200		
	Ratio(%)	0.04	0.05	0.11
Capacity	Shear capacity V_n (kN)	203.8	155.2	100.4
	Flexural capacity M_n (kN×m)	127.8	109.4	71.3
	Capacity ratio $V_n \times a/M_n$	1.28	1.14	1.12

위치까지의 높이는 800 mm로 모두 동일하다. 그러나 재하 방향에 직각방향(면외방향)으로의 단면치수는 각각 200 mm, 400 mm, 600 mm이다. 면내방향의 주철근과 횡철근은 동일하게 배치되어 있다. 면외방향으로의 주철근도 면외방향의 단면치수비와 유사하게 되도록 주철근을 배치하였다. 따라서, 시험체를 2차원 영역에서 모델링하는 경우 매우 유사한 특성을 지니게 된다.

시험체의 제원 및 철근상세는 Fig. 5와 같고 시험체의 특성을 요약하면 Table 1과 같다. Table 1의 전단강도(V_n) 산정에는 전단경간비(a/d), 주철근비, 단면크기의 영향을 고려할 수 있도록 아래의 수정Okamura-Higai¹⁵⁾ 식을 이용하였다.

$$f_v = f_{w0}(0.75 + 1.4d/a)(1 + \beta_p + \beta_d) \quad (3a)$$

$$f_{w0} = 0.20f_c^{1/3} \quad (3b)$$

$$\beta_p = p_w^{1/2} - 1 \quad (p_w < 3\%) \quad (3c)$$

$$\beta_d = d^{-1/4} - 1 \quad (d < 1.1) \quad (3d)$$

여기서, f_c 콘크리트 강도(MPa), p_w 는 철근비(%), d 는 유효깊이(m), a 는 전단경간 길이(m)이다.

3.2 시험체의 설치 및 재하

Fig. 6은 시험체의 설치모습을 나타내고 있다. 설계된 전단경간비가 유지되도록 시험체와 재하판 사이에 두께 5 mm의 철판을 삽입하였다. 시험체의 수평변위를 계측하기 위하여 재하위치에 변위계를 설치하였으며 기초부의 수평변위를 계측하기 위해서 변위계를 설치하였다. 한편, 주철근의 인발량(pull-out)을 계측하기 위하여 교각의 하단부에 앵글을 부착하고 변위계를 설치하여 계측하였다.

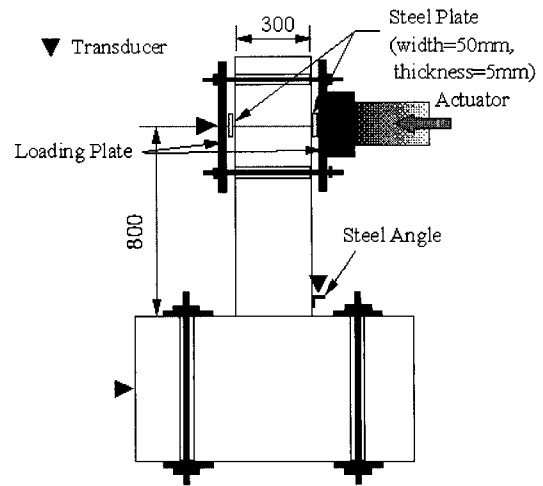


Fig. 6 Test set-up

이 실험의 주요목적은 비교적 전단거동이 우세한 기둥, 특히 면외방향으로 단면치수가 다른 기둥의 비선형 거동 특성의 차이를 파악하고 이들의 거동특성을 해석적으로 모사하는데 필요한 정보를 제공하는데 있다. 이에 본 실험에서는 변위제어로 단조증가 하중을 파괴시까지 재하하는 것을 기본으로 하였고 하중 제거시의 거동특성을 살펴보기 위하여 비교적 작은 변위영역에서 수차례에 걸쳐 하중을 제거하고 다시 재하하였다. 축력은 재하되지 않았다.

3.3 실험결과

Fig. 7은 시험체의 하중-변위 이력곡선이다. 시험체 T60의 경우, 약 70 kN에서 횡철근 위치에서 휨 균열이 발생하였다. 127 kN에서 휨균열의 끝에서 아래쪽 방향으로 향하는 경사균열이 발생하여 재하와 함께 서서히 진전되었다.

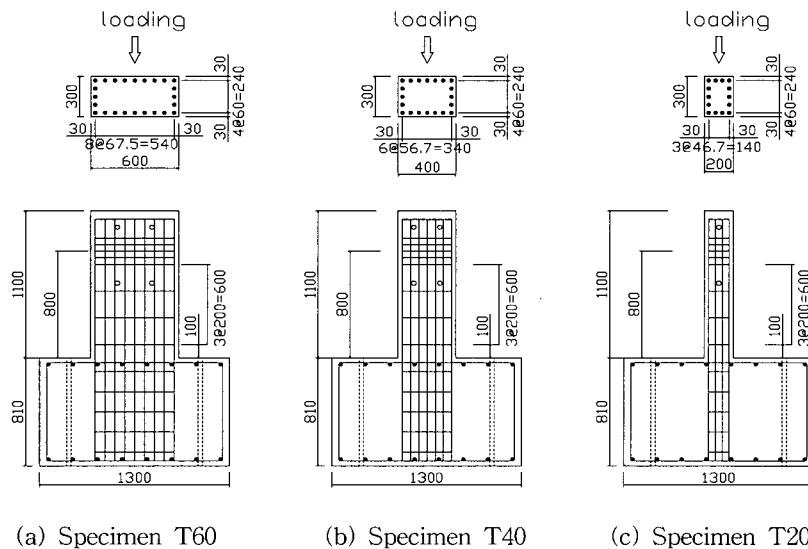
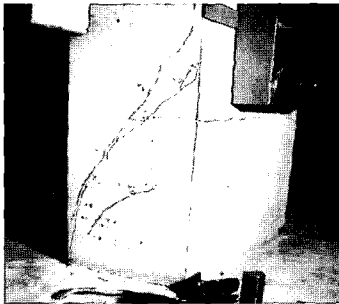


Fig. 5 Dimensions of specimens

최대하중 근처에서 이 경사균열은 위쪽방향으로 진전되어 재하점과 교각하단을 잇는 하나의 큰 경사균열을 형성하였다. 이 경사균열에 의하여 전체거동이 지배된 것으로 보이며 더 이상의 휨균열은 발생하지 않았다.

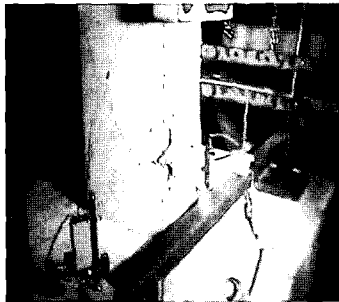
매우 유사한 경향이 시험체 T40에서도 관측되었다. 약 40 kN에서 선명한 휨 균열이 발생하였고 이어서 경사균열이 발생하였다. 최종 파괴는 시험체 T60과 유사하게 큰 경사균열에 의한 것이었다. 시험체 T20의 경우, 경사균열 이후에도 다수의 휨균열이 추가적으로 발생하였으며 하중 증가와 함께 균열폭이 확대되어 다소 연성적인 거동을 나타내었다. 최대하중 이후에 다소의 수평강도 감소가 있었으나 더 이상의 감소 없이 진행되었다. 축력이 재하되지 않은 상태에서 수평강도가 급격하게 감소되지 않은 것으로 판단된다. 최종파괴 형태는 휨-전단파괴였다. 시험체의 균열 진행모습은 Photo 1과 같다.



(a) Specimen T60



(b) Specimen T40



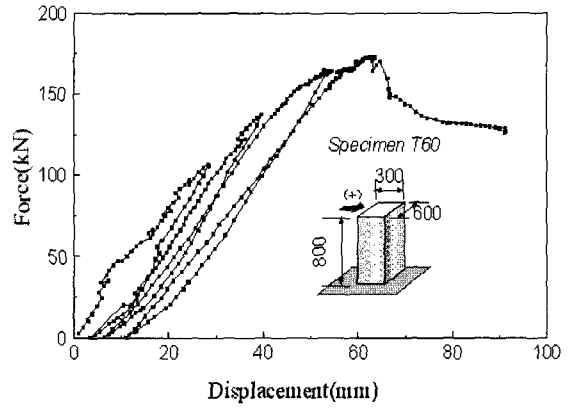
(c) Specimen T20

Photo 1 Crack pattern

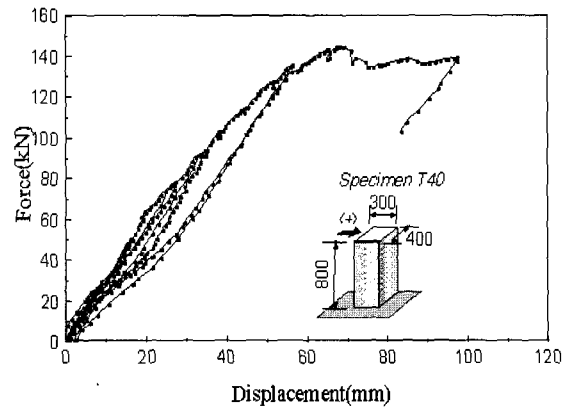
4. 3차원 해석

4.1 해석과 실험결과와의 비교

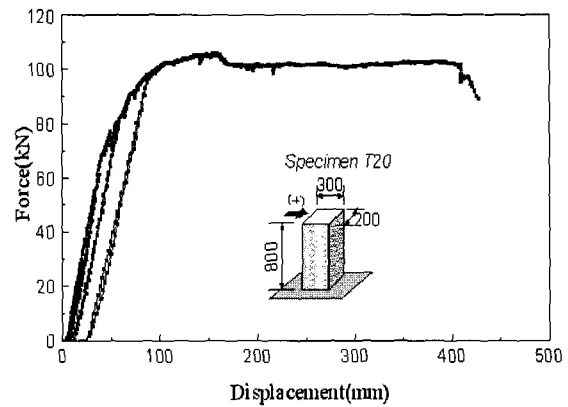
시험체는 20개의 절점을 가진 3차원 입체요소를 사용하여 기초부는 제외하고 기둥부분만을 모델링하였으며 제일 아래쪽에 위치하는 절점은 완전고정으로 하였다.



(a) Specimen T60



(b) Specimen T40



(c) Specimen T20

Fig. 7 Load-displacement curves

따라서, 주철근의 인발에 의한 변위는 해석에서 모사되지 않는다. 해석과 실험결과를 비교하기 위하여 실험결과에서는 주철근의 인발에 의한 변위량은 제거하였다. 단면은 RC영역과 PL영역으로 영역화하여 각기 다른 재료모델을 적용하였다.

해석모델의 요소분할은 Fig. 8의 안에 나타내었다. 전술한 바와 같이 영역화 문제는 여전히 확립되지 않은 상태여서 RC영역의 크기를 변화시켜 실험결과와 비교하였다. Fig. 8 내의 모델에서와 같이 주철근의 위치를 요소(mesh)의 중심부에 위치시키기 위하여 우선, 피복두께의 2배에 해당하는 RC영역(철근비가 포함)을 설정하고 추가적으로 철근비가 없는 RC 영역을 설정하였다. Fig. 8에 해석과 실험결과를 비교하였다.

실험결과는 골격곡선만을 나타내었다. 해석과 실험결과를 비교하면 우선 초기강성에 차이가 나타나고 있다. 해석에서 균열 이후에 나타나는 강성이 실험에서는 재하 초기 단계부터 나타나고 있다. 이는 시험체 제작시 기초부와 기둥부를 분리하여 타설하기때문에 이들 사이에는 이미 균열이 존재하기 때문인 것으로 사료된다. 이런 초기강성의 차이로 인하여 해석과 실험의 전체변위에 차이가 나타나고 있다. Fig. 8에서와 같이 RC영역의 크기에 따라 수평강도 및 파괴형태에 큰 차이가 있음을 알 수 있다. RC영역이 커짐에 따라 전단파괴 형태가 휨파괴 형태로 변화되며 이에따라 수평강도와 연성도가 증가하는 것을 알 수 있다. RC영역의 경우에는 균열 후에도 상당한 응력을 전달하게 되지만 PL영역에서는 균열 후 급격한 응력이완이 일어나고 이완된 응력이 인접한 PL요소에 전달되어 파괴가 빠르게 진행되기 때문이다.

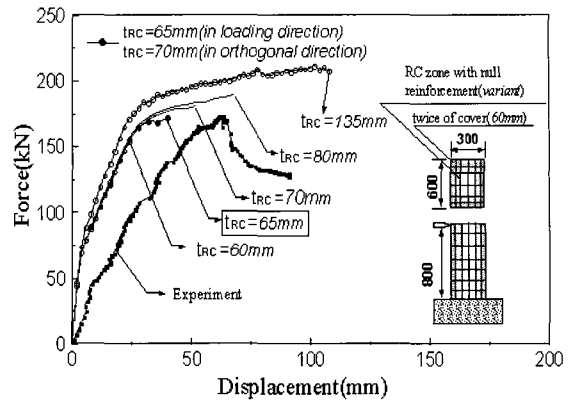
면내방향으로 동일한 철근 배근을 갖는 시험체의 특성상 면외방향으로는 동일한 RC영역을 설정하는 것이 합리적이다. 따라서, 면외방향으로 70 mm의 RC영역을 가지면서 실험결과와 가장 유사한 결과를 주는 면내방향으로의 RC영역의 크기는 시험체 T60, T40, T20에서 각각 65 mm, 75 mm, 90 mm이다. 이를 RC영역에서의 철근비로 계산하면 면내방향으로 각각 2.92%, 2.96%, 2.82%이고 면외방향으로는 3.02%여서 대략 3% 정도의 수준이다. 식(2)로 RC영역의 철근비를 계산하면 약 1% 정도여서 식(2)를 사용하면 RC영역이 크게 설정되는 것을 알 수 있다.

4.2 파괴메커니즘 특성

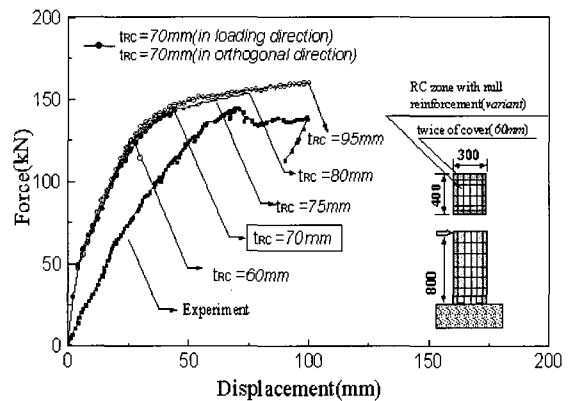
시험체의 파괴메커니즘 특성을 알아보기 위하여 전단변형률의 분포와 하중에 따른 전단변형률의 진전 특성을 분석하였다. 파괴되기 바로 전 하중단계에서 기둥의 파괴단면의 전단변형률의 분포특성을 나타내면 Fig. 9와 같다. 2차원 해석의 경우 면외방향에 대해서는 균일한 분포성으로 간주되는 것과 달리 강한 비균일성을 나타낸다. 이러한

경향은 면외방향으로의 단면치수가 큰 시험체에서 강하게 나타난다.

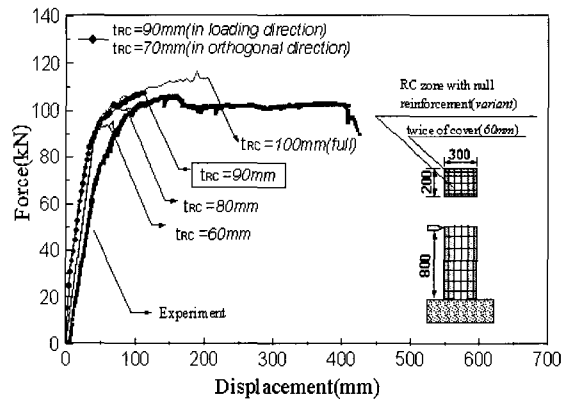
Fig. 10은 하중단계별 전단변형률 분포의 진전상황을 나타낸 그림이다. 시험체 T20의 경우 파괴시까지 점차적으로 진전되는데 비해 시험체 T60의 경우에는 강한 비균일성을 나타내면서 급작스럽게 진행되어 파괴에 이르는 것을 알 수 있다.



(a) Specimen T60

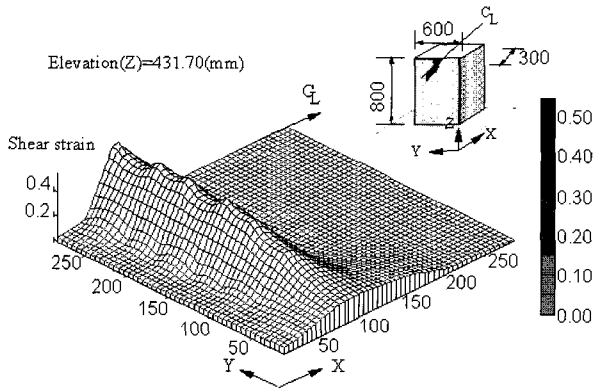


(b) Specimen T40

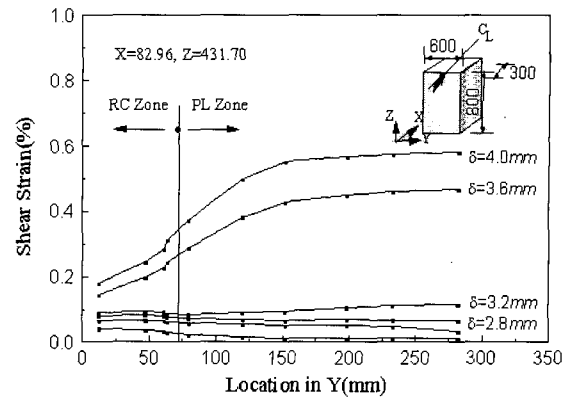


(c) Specimen T20

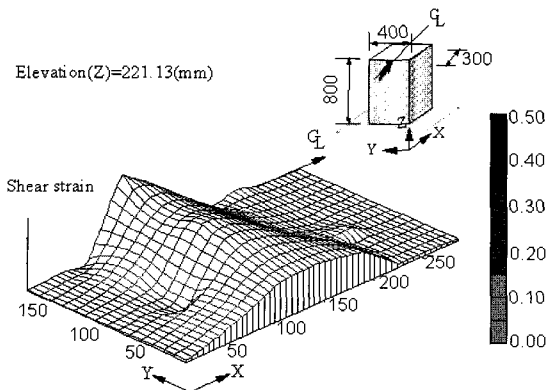
Fig. 8 Comparison of experiment and analytical results



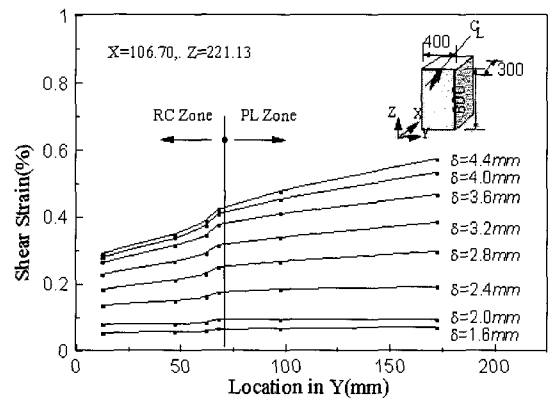
(a) Specimen T60



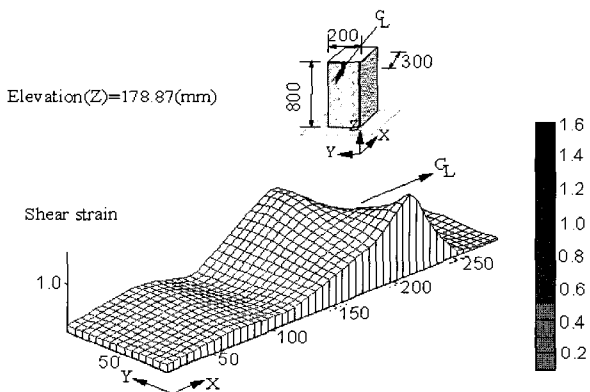
(a) Specimen T60



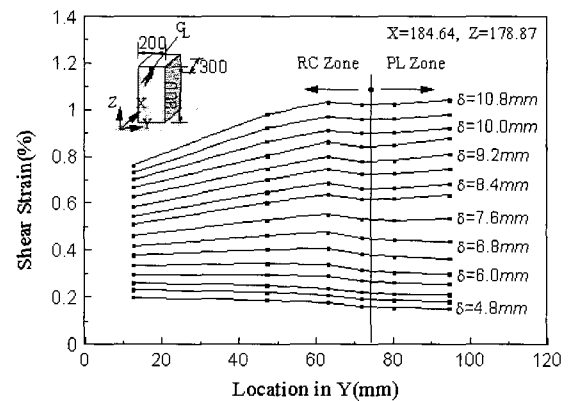
(b) Specimen T40



(b) Specimen T40



(c) Specimen T20



(c) Specimen T20

Fig. 9 Shear strain distribution

파괴 직전의 최대전단변형률을 비교하면 시험체 T20이 1% 이상인데 비해 시험체 T60에서는 0.6% 수준으로 매우 낮아 급격한 전단파괴가 동반되는 것을 알 수 있다. PL 영역에서의 이러한 비균일성 특성은 또 다른 하나의 크기효과로 나타나게 된다. 이 실험결과로부터 외형상 전단 거동이 우세하고 면의방향으로 단면치수가 큰 부재는 PL 영역에서 전단변형률이 효과적으로 제어되지 않아 면의방향으로 단면치수가 작은 부재에 비하여 보다 급작스럽게 파괴될 수 있음을 알 수 있다.

전단거동이 우세한 기둥의 비선형 해석에 관한 연구

Fig.10 Development of shear distribution

5. 유사 등가 2차원 해석

기둥의 경우 인장 및 압축영역에 위치한 주철근은 면의 방향으로 연속적으로 배치되어 있어 RC영역으로 취급할 수 있다. 그러나, 측면에 위치한 주철근은 면의방향으로 연속적으로 배근되어 있지 않아 RC와 PL영역이 교대로 나타나고 이러한 특성을 2차원 해석모델의 면내요소에만 반영하지 못한다면 3차원 해석결과와 다른 결과를 얻게 된

다. 측면부에만 주철근이 배근되는 기둥 단면의 중앙부(면내 방향의 중앙)에 대해서 인장 및 전단모델의 경화계수를 RC영역에서 채용하고 있는 $c=0.4$ 를 적용하여 해석한 결과는 Fig. 11과 같다. 3차원 해석과 비교하여 모든 경우에 변위성능을 과다하게 예측한다. 이는 면외방향의 RC 및 PL영역의 다른 재료특성을 RC영역의 특성만으로 고려하고 있기 때문이다. 시험체 T60의 유사등가2차원 해석(면외방향으로 평균주철근비를 적용하고 동일한 경화계수 적용)의 전단변형률의 분포는 Fig. 12와 같고 하중단계별 전진형태는 Fig.13과 같다. 3차원 해석결과와 달리 면외방향으로 균일한 분포특성을 나타내고 파괴시까지 점진적으로 전진됨을 알 수 있다. 파괴시의 전단변형률의 수준도 15%를 넘어서서 급격한 전단파괴가 일어나지 않고 있다. 따라서, 2차원 해석에서도 3차원 해석결과와 유사한 결과를 얻기 위해서는 기둥 단면 중앙부의 특성을 표현할 수 있는 재료모델이 필요하며 이는 RC영역과 PL영역의 중간적인 특성을 갖게 될 것이다. 인장모델 및 전단모델의 경화계수를 변화시켜 유사등가 2차원 해석을 수행하였다.

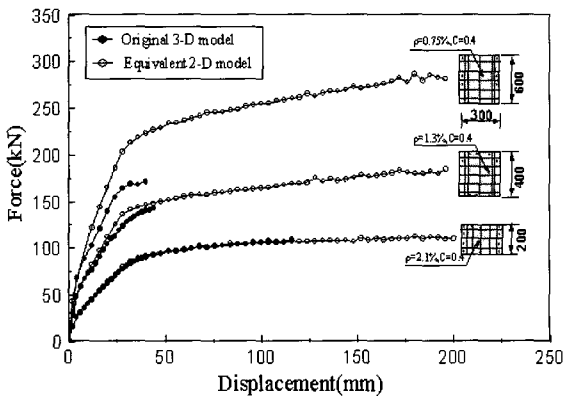


Fig.11 Comparison of results in 3D and equivalent 2D analysis

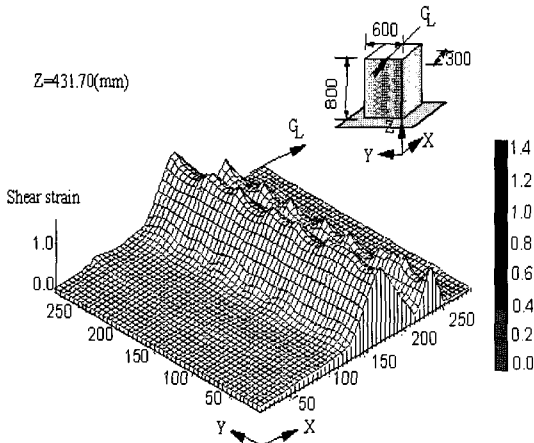


Fig.12 Shear strain distribution in pseudo 2D analysis

Fig. 14는 유사등가 2차원 해석과 3차원 해석결과의 비교이다. 모델 T60, T40, T20의 경화계수가 각각 1.0, 0.7, 0.5일때 3차원 해석과 가장 유사한 해석결과를 얻었다. 예측 가능하듯이 면외방향으로 크기가 커질수록 경화계수 값이 커져 PL영역과 유사한 특성 값을 갖게 된다. 이 해석결과는 전단거동이 우세한 기둥의 비선형 거동특성도 적절한 경화계수를 도입하면 3차원 해석결과와 매우 유사하게 2차원 해석에서도 모사할 수 있음을 알 수 있다.

6. 결 론

본 논문에서는 전단거동이 우세한 기둥의 비선형 수평거동 특성을 3차원 및 2차원 해석으로 모사하는데 있어서 적합한 모델링 및 해석방법에 대하여 다루었다. 이를 위하여 면내방향으로는 매우 유사한 특성을 지니지만 면외방향으로 각기 다른 단면치수를 갖는 시험체를 제작하여 정적재하 실험을 수행하였다. 실험결과와 해석결과로부터 이들 시험체의 비선형 거동특성 및 파괴메커니즘을 분석하였다.

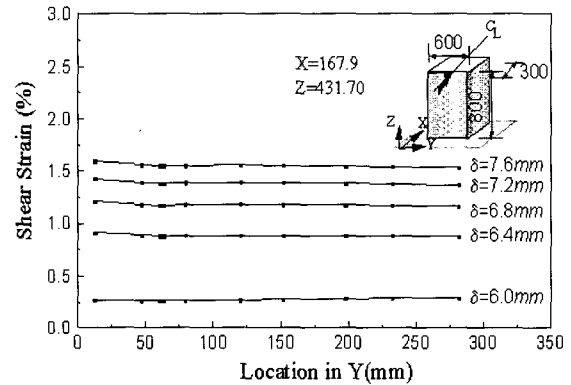


Fig.13 Development of shear strain distribution in equivalent 2D analysis

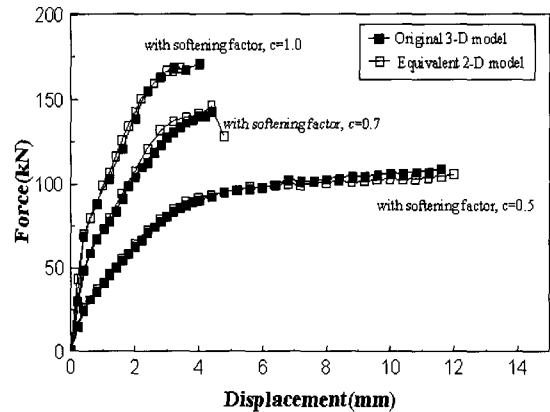


Fig.14 Analytical results of equivalent 2D analysis with softening factor

연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 수평하중을 받는 기둥의 비선형거동특성은 철근과 콘크리트의 부착특성을 고려하여 기둥단면을 RC영역과 PL영역으로 영역화하고 각각 인장/전단의 경화모델 및 연화모델을 적용하여 유사하게 모사할 수 있다.
- 2) 면내방향으로 매우 유사한 특성을 지니더라도 면외방향으로 단면치수가 큰 기둥은 보다 취성적인 파괴형태를 나타낸다. 이는 면외방향으로 PL영역이 확대되기 때문에 전단변형을 분포의 비균일성이 커지게 되고 하중증가에 따라 급격하게 진전되어 파괴에 이르기 때문이다.
- 3) 이러한 면외방향으로의 비균일한 변형을 분포 특성을 고려하지 않는다면 2차원해석에서의 기둥의 비선형 거동특성(수평강도 및 변위성능)은 과대평가 될 수 있다.
- 4) 측면부에 주철근이 배근되는 기둥의 경우에도 단면 중앙부에 대하여 적절한 인장 및 전단모델의 경화계수를 도입하면 2차원 해석에서도 3차원 해석결과와 유사하게 모사할 수 있다.
- 5) 면외방향으로의 단면치수가 커질수록 인장 및 전단 경화계수 값은 커져 PL영역에 가까운 특성을 나타내게 되며 이는 취성적인 파괴가 쉽게 일어날 수 있음을 의미한다.
- 6) RC영역화 문제는 해석결과에 상당한 영향을 미치게 되지만 이에 대한 연구는 거의 수행되어 있지 않아 향후 많은 연구가 수행되어야 한다. 또한, 2차원 해석에 있어서의 적절한 경화계수를 합리적으로 산정할 수 있는 방법에 대해서도 연구가 수행되어야 한다.

감사의 글

이 논문은 2002년 울산대학교의 연구비에 의하여 연구되었고 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 김재관, 김익현, 임현우, 전귀현, “수평반복하중을 받는 비내진상세 RC 중실원형교각의 거동특성”, 한국지진공학회 논문집, 5권 4호, 2001, pp.83~95.
2. 정영수, 이강균, 한기훈, 이대형, “원형중공 콘크리트 교각의 내진성능에 대한 준정적 실험”, 한국지진공학회 논문집, 3권 2호, 1999, pp.41~54.
3. 김병석, 김영진, 박임중, 조창백, 조정래, “휨-전단 복합 거동을 보이는 RC 원형교각의 내진성능 평가”, 한국지진공학회 논문집, 5권 3호, 2001, pp.29~36.

4. 김태훈, 이상철, 신현목, “비탄성 손상해석을 이용한 철근콘크리트 교각의 내진성능 평가”, 대한토목학회논문집, 21권 3-A호, 2001, pp.361~372.
5. 유영화, 최정호, 신현목, “횡방향철근의 구속효과를 고려한 반복하중을 받는 철근콘크리트 부재의 비탄성 해석”, 한국지진공학회 논문집, 2권, 1호, 1998, pp.79~92.
6. Maekawa, K. Takemura, J., Irawan, P., and Irie, M., “Triaxial elasto-plastic and fracture model for concrete,” *Proc. of JSCE*, Vol.18, No.460, 1993, pp.31~138.
7. Maekawa, K. Irawan, P., and Okamura, H., “Path-dependant three-dimensional constitutive laws of reinforced concrete-formulation and experimental verifications,” *Struct. Eng. Mech.*, No.6, Vol.5, 1997, pp.743~754.
8. Okamura, H., Maekawa, K., and Silvasubramaniyam, S., “Verification of Modeling for Reinforced Concrete Finite Element”, *Proc. of Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures*, ASCE, 1986, pp.528~543.
9. Li, B., Maekawa, K. and Okamura, H., “Contact density model for stress transfer across cracks in concrete,” *Journal of the Faculty of Engineering, University of Tokyo (B)*, Vol.40, No.1, 1989, pp.9~52.
10. Bazant, Z.P. and Oh, B.H., “Crack band theory for fracture of concrete,” *Material and Structures, (RILEM, Paris)*, Vol.16, 1983, pp.157~177.
11. Comite Euro-International du Beton, “CER-FIP Model Code 1990-Final Draft,” Chapter 1-3. Bulletin d'Information, No.223, 1991.
12. Bujadaham, B. and Maekawa, K., “Qualitative studies on mechanisms of stress transfer across cracks in concrete,” *Proc. of JSCE*, Vol.17, No.451, Aug., 1992, pp.265~275.
13. An, X., Maekawa, K., and Okamura, H., “Numerical simulation of size effect in shear strength of RC beams,” *J. Materials Conc. Structures, Pavements, JSCE*, Vol.35, May, 1997, pp.297~316.
14. 변근주, 하주형, 송하원, “철근콘크리트 보의 전단거동의 크기효과 해석”, 한국콘크리트학회 봄학술발표회 논문집, Vol.10, No.1, 1998, pp.321~326.
15. Okamura H. and Higai Y., “Proposed design equation for shear strength of reinforced concrete beams without web reinforcement,” *Proc. of JSCE*, Vol.300, Aug., 1980, pp.131~141.

요 약

철근콘크리트(RC)의 경우 철근과 콘크리트의 부착특성에 의한 균열의 제어로 균열 후의 재료모델은 무근콘크리트(PL)와 다르다. 수평력을 받는 RC 기둥의 비선형 거동특성을 기둥의 단면을 영역화(RC영역과 PL영역)하여 각기 다른 재료모델을 적용하여 3차원 해석으로 모사하였다. 파괴시 면외방향으로의 전단변형률은 비균일성을 나타내면서 진전되고 이러한 경향은 면외방향으로의 두께가 클수록 강하게 나타났다. 이러한 변형률의 분포특성을 고려하지 않는다면 2차원 해석에서는 기둥의 내하력과 변위성능을 과다하게 예측하게 된다. 인장과 전단모델에서 적절한 등가 경화계수를 도입함으로써 2차원 해석에서도 3차원 해석과 유사한 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다.

핵심용어 : RC교각, 비선형해석, 전단파괴, 3차원해석, 연화계수, 영역화 문제
