

횡방향 철근의 구속효과를 고려한 반복하중을 받는 철근콘크리트 부재의 비탄성해석

Inelastic Analysis of Reinforced Concrete Structure Subjected to Cyclic Loads with Confining Effects of Lateral Tie

유 영 화* 최 정 호** 신 현 목***
Yoo, Young Hwa Choi, Jeong Ho Shin, Hyun Mock

국문요약

철근콘크리트부재가 갖는 균열의 발생, 항복 및 파괴 등의 단계별 역학적 거동의 특성을 정확히 예측하고 모사할 수 있는 해석기법의 개발을 목적으로 하였다. 이를 위해서 균열발생후의 철근과 콘크리트의 부착거동, 균열면에서의 골재의 맞물림 거동 및 철근항복후의 모델링 등에 의해서 반복하중을 받는 철근콘크리트 구조부재의 항복후 파괴거동을 예측할 수 있는 해석모델을 개발하였다. 두께가 서로 다른 부재간의 접합부에서는 단면강성이 급변하기 때문에 기초의 바닥으로부터 철근의 인발, 접합면의 미끄러짐 및 접합면의 관입 등의 국소적인 불연속 변형이 집중하게 된다. 이와 같은 국소적인 불연속 변형이 교각구조의 변형능력에 미치는 기여도는 일반적으로 무시할 수 없는 정도이므로, 불연속 변형을 고려하기 위한 접합요소(joint element)를 도입하였다. 또한 축방향철근 및 횡방향 구속철근의 유무 및 그 양 등에 따른 구속효과를 적절히 표현할 수 있는 해석모델을 개발하였다. 각각의 해석모델들을 조합한 유한요소 해석프로그램에 의한 결과를 다른 연구자들의 결과와 비교하여 타당성을 검증하였다.

주요어 항복후 거동, 부착 거동, 국소적인 불연속 변형, 경계면, 접합요소, 구속효과, 횡방향 타이

ABSTRACT

An objective of this research is to develop an analysis method capable of evaluating the characteristics of mechanical behaviour at each phase from the initiation of crack to yielding and failure of reinforced concrete member. An analytical model is developed in order to predict post-failure behaviour of reinforced concrete member through considering bond behaviour between reinforcement and concrete after the crack occurred, aggregate interlocking at crack plane, and bilinear behaviour of reinforcing bar after yielded. In boundary plane at which each member with different thickness is connected, due to the abrupt change in their stiffness local discontinuous deformations such as pulling out of reinforcing bar from the footing, slipping in boundary plane, and penetration into the boundary plane are likely to occur. Effects of these local discontinuous deformations on deformational capacity of pier system are significant enough not to be neglected. These deformational characteristics can be taken into account by introducing joint element. Also an analytical model is developed to express the confining effects of lateral tie which depend on the existence or nonexistence and the amounts of transverse confinement, etc.

Key words : *post-failure behaviour, bond behaviour, local discontinuous deformation, boundary plane, joint element, confining effects, lateral tie*

1. 서 론

철근콘크리트 교각구조는 상부구조를 지지할 뿐 아니라, 수평력에도 안전성을 확보해야

하며 허용하중 이상의 큰 하중에 대해서도 그 피해가 최소로 되도록 설계되어야 한다. 지진 피해 사례로부터 알 수 있듯이, 휨 항복에 의한 변위를 상당히 초월하는 변위가 발생한 경우에도 전단파괴에 대하여 충분한 여유가 있으면 붕괴에 이르지 않았다(Fig. 1).⁽¹⁾

* 정회원 · 국립 안성산업대학교 토목공학과 강사

** 국립안성산업대학교 토목공학과 강사

*** 정회원 · 성균관대학교 토목공학과 부교수

이것은 전단파괴에 대해서 충분한 인성(toughness)을 갖도록 하여 지진력과 같은 반복하중에 의한 붕괴를 방지하도록 한 교각의 설계법이 타당함을 증명하는 것이다. 철근콘크리트 기둥과 같은 교각구조의 인성을 증가시키기 위해서 횡방향으로의 구속철근을 배근하는 것이 일반적이며, 이 횡방향으로의 구속철근으로 인해서 콘크리트는 보다 큰 압축력에 저항할 수 있게 되며, 부재가 항복한 이후에는 횡방향으로의 구속철근이 없는 경우에 비해서 비탄성거동 또는 연성거동이 우수하게 나타난다.^(2,3) 따라서, 지진하중 등의 반복하중에 대해서 효과적으로 저항할 수 있게 된다.

본 연구에서는 횡방향 구속철근이 배근된 철근콘크리트 부재의 비탄성거동을 적절히 표현할 수 있는 해석기법을 개발하여 지진하중과 같은 반복하중에 대한 철근콘크리트 기둥 부재의 파괴거동을 예측하였다. 이를 위해서는 철근콘크리트 부재가 갖는 균열의 발생, 항복

및 파괴 등의 단계별 역학적 거동의 특성을 정확히 예측하고 모사할 수 있는 해석기법의 개발이 필수적이다. 우선, 균열 발생후의 철근과 콘크리트의 부착거동, 균열면에서의 골재의 맞물림 거동 및 철근 항복후의 모델링 등을 고려하고, 분산균열개념(smeared crack concept)에 기초한 콘크리트의 압축강성, 인장강성 및 전단강성모델(Fig. 1)과 항복후의 철근모델 등을 통하여 반복하중을 받는 철근콘크리트 부재의 항복후 파괴거동을 예측할 수 있는 해석기법을 제시하였다. 횡방향 철근에 의한 구속효과는 구속되지 않은 콘크리트의 압축강성모델을 수정함으로써 고려하였고, 두께가 서로 다른 부재간의 접합부에서 발생하는 철근의 인발, 접합면의 미끄러짐 및 접합면의 관입 등의 국소적인 불연속변형은 이산균열개념(discrete crack concept)에 기초한 접합요소(joint element)를 도입함으로써 고려하였다.

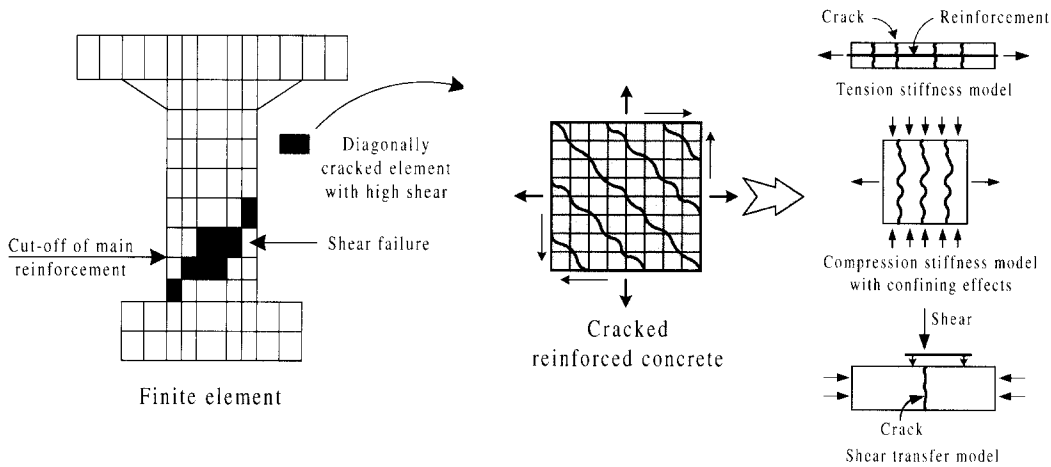


Fig. 1 Finite element meshes and modeling of reinforced concrete element⁽⁴⁾

2. 반복하중하에서의 균열의 취급

콘크리트와 같은 취성재료를 대상으로 하는 유한요소해석에 있어서 균열의 취급⁽⁵⁾은 이산균열모델(discrete crack model)과 분산균열모델(smearred crack model)로 대별된다. 이산균열모델의 적용에 있어서는 요소(mesh)를 연속적으로 재구성해야 하기 때문에, 복수의 균열이 발생하는 상황 등에 있어서는 비효율적이 되고 만다. 이와 같은 단점은 요소의 재구성(remeshing)이 필요하지 않는 분산균열모델(smearred crack model)을 사용한 접근을 시도함으로써 극복할 수 있다.

분산균열모델을 적용한 균열의 취급은 다시 고정균열모델(fixed crack model) 및 회전균열모델(rotating crack model)로 나뉘어진다. 회전균열모델(rotating crack model)에서는 제 1균열과 제 2균열의 방향이 주변형도의 방향과 일치하도록 연속적으로 변하는 것으로 취급하므로 임의의 하중단계에서 발생하는 국소적인 균열(discrete crack)의 취급에 대해서는 신뢰할 수 있는 결과를 가져다 준다. 그러나 판(plate)이나 벽체(wall) 등과 같은 철근콘크리트구조물은 유한영역에 대한 연속체로 간주되어 복수의 균열이 분산분포하여 발생하게 되는 것이 일반적이므로, 국소부분이 아닌 구조물 전체의 거시적인 거동이 중요한 경우에는 균열의 발생 또는 방향을 유한영역내에서 평균적으로 취급하고 있는 고정균열모델의 적용이 바람직하고, 더욱이 반복하중을 받는 경우에는 균열면에서의 하중이력을 기록할 필요가 있으므로 회전균열모델의 적용은 불가능하다.

고정균열모델에서는 가우스적분점에서의 초기 균열이 콘크리트의 최대 주인장응력 방향에 직교인 방향으로 발생하는 것으로 가정하고 있으며, 실제 주응력의 방향에 대해서 균열의 발생을 판정하는 비직교균열모델(non-orthogonal crack model)를 적용하였다.

또한, 강성이 급변하는 접합부에서는 이산균

열모델을 적용함으로써 전체변형에 부가되는 국소적인 불연속변형을 고려하였다.

3. 철근콘크리트요소의 해석모델

철근콘크리트는 일반적으로 콘크리트와 철근이 중첩된 것으로 표현할 수 있다. 단, 콘크리트와 철근사이에는 부착이 존재하므로, 개개의 철근 및 콘크리트의 해석모델을 단순히 합하는 것이 아닌, 철근콘크리트로서의 각 해석모델이 조합된 것으로 표현해야 한다.

3.1 횡방향철근으로 구속된 콘크리트의 모델

횡방향으로 배근된 구속철근은 콘크리트의 극한강도와 극한변형도를 크게 증가시키는 효과를 가져다 준다(Fig. 2). 이와 같이 증가된 콘크리트의 강도와 변형도로 인해서 지진하중 등과 같은 반복하중을 받는 경우에 콘크리트의 부재는 구속되지 않은 경우에 비해서 우수한 연성능력 및 복원력특성을 나타낸다. 구속된 콘크리트의 압축강성을 표현하기 위한 압축응력-압축변형도 관계에 대해서는 많은 연구자들^(2,6)이 제안한 모델이 있으며, 본 연구에서는 콘크리트의 단면형상에 관계없이 적용할 수 있고, 종방향 철근 및 구속철근의 양, 구속철근의 항복강도 및 배근형태 등을 고려할 수 있도록 한 Mander⁽⁶⁾ 등의 제안모델을 사용하였다.

이 모델에서는 횡방향으로의 구속효과를 임의 단면형상에 대한 유효구속응력(effective confining stress)과 유효구속계수(effective confining coefficient)를 구함으로써 고려할 수 있다.

유효구속응력, σ'_l 은 식 (1)과 같이 평균구속응력에 유효구속계수를 곱한 값으로 정의된다.

$$\sigma'_l = k_e \sigma_l \quad (1)$$

여기서 k_e 는 횡방향철근에 의해서 구속된 콘크리트의 단면적에 대한 콘크리트 심부의 유효단면적의 비를 나타내며 유효 구속계수라고 한다.

직사각형단면의 경우에, 각 방향으로의 유효구속응력은 다음 식과 같이 표현된다.

$$\sigma_{lx}' = k_e \rho_{tx} \sigma_{yh} \quad (2)$$

$$\sigma_{ly}' = k_e \rho_{ly} \sigma_{yh}$$

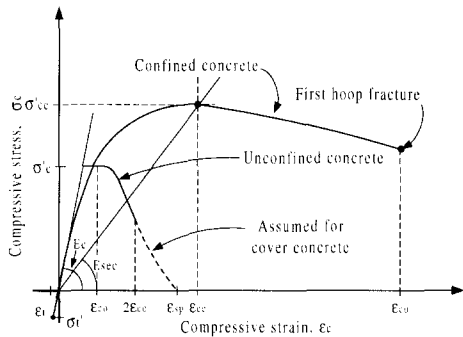


Fig. 2 Stress-strain model proposed for confined and unconfined concrete

3.2 균열발생전의 콘크리트 모델

균열발생전 콘크리트의 역학모델은 Fig. 3과 같이 제하(unloading) 및 재재하(reloading)와 같은 임의의 하중이력에 대해서도 동일한 모델로서 표현이 가능한 Maekawa와 Okamura (1983)의 2축 응력상태에 대한 탄소성파괴모델 (elasto-plastic and fracture model)⁽⁷⁾을 수정하여 사용하였다. 탄소성 파괴모델에 의하면, 식 (3)과 같은 등가응력(equivalent stress)과 등가 변형도(equivalent strain)의 관계에서 등가응력은 초기탄성계수(initial elastic modulus), 파괴

여기서 ρ_{tx} 와 ρ_{ty} 는 각각 콘크리트 단면의 x, y 방향으로의 구속철근의 철근비를 나타내고, σ_{yh} 는 항복응력을 나타낸다.

본 연구에서는, 구속된 콘크리트의 최대 압축강도 σ_{cc}' 를 계산하는데에는, 3축 압축응력상태에 대해서 William과 Warnke가 제안한 모델을 적용하였다. 이 모델에서는 Fig. 4에서와 같이 두 횡방향으로의 구속응력으로부터 구속강도비(confined strength ratio)를 구할 수가 있다.

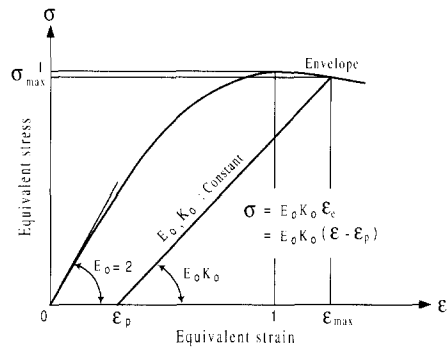


Fig. 3 The equivalent stress-strain relationship^(4,7)

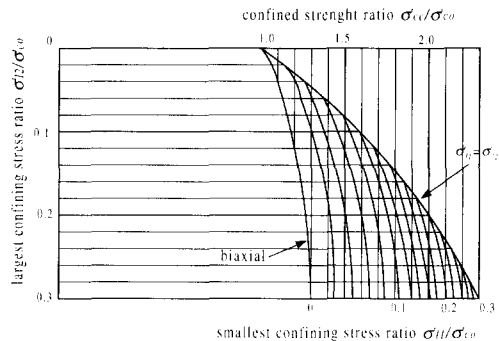


Fig. 4 Confined strength determination from lateral confining stresses for rectangular section⁽⁵⁾

파라미터(fracture parameter) 및 등가 소성변형도(equivalent plastic strain)의 함수로 표현

된다.

$$\sigma = E_o K_o (\epsilon - \epsilon_p) = E_o K_o \epsilon_e \quad (3)$$

여기서, σ 와 ϵ 는 등가응력과 등가의 총변형도(= $\epsilon_e + \epsilon_p$)를 각각 의미하며, ϵ_e 와 ϵ_p 는 등가의 탄성 및 소성변형도를 각각 나타낸다. E_o 와 K_o 는 각각 콘크리트의 초기강성과 강도의 저하를 표현하고 있는 파괴파라미터를 나타낸다

3.3 균열발생의 기준(cracking criteria)

콘크리트의 비선형성의 분파점이 되는 균열의 발생은 콘크리트의 일축압축강도, 2축 응력 상태, 크기효과 및 건조수축 등에 의해서 영향을 받기 때문에, 균열의 발생시점을 정확히 예측하기란 어렵다. 본 연구에서는 균열의 발생 기준을 균열발생시의 인장응력에 기준으로 설정하였으며, 위의 영향들은 일축압축강도를 수정함으로써 고려하였다.

균열의 발생기준은 제 1균열발생기준과 제 2균열의 발생기준으로 나누어지며 제 1균열의 발생기준으로는 콘크리트의 주인장변형도가 인장변형도에 도달하게 되면 균열이 발생하는 것으로 하였으며, 이 값은 콘크리트의 응력이 파괴포락선(fracture envelope)에 도달하였을 때의 주인장변형도를 나타낸다. 또한, 균열이 발생한 후에도 이미 존재하는 균열과 다른 새로운 방향의 주응력이 증가될 수 있고, 주응력이 균열기준을 넘게되면 새로운 제 2균열이 발생하게 된다. 단, 제 1균열의 방향과 제 2균열 사이의 각이 15°를 넘지 않을 경우에는 제 2균열은 발생하지 않는 것으로 본다. 제 2균열의 발생기준은 제 1균열의 발생기준과 동일함으로 하였다.

2축 응력상태에 대한 파괴포락선으로서는 Fig. 5에 보이는 것과 같이, 압축-인장영역에

대해서는 Niwa의 모델⁽⁸⁾을, 인장-인장영역에 대해서는 Yamada의 모델⁽⁹⁾을 적용하였다.

Fig. 5에서 σ_1 과 σ_2 는 각각 주응력을 나타내고, σ_1' 과 σ_2' 는 콘크리트의 일축인장강도와 압축강도를 각각 나타내며, 콘크리트의 일축인장강도 σ_t' 는, 공시체의 활렬강도에 크기효과와 시공조건을 고려한 값이다. 발생된 균열의 각도는 주인장응력에 직교하는 것으로 가정하였다.

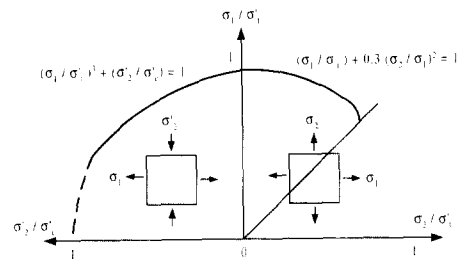


Fig. 5 Cracking stress criteria for 2-D stress states⁽⁴⁾

3.4 균열발생후의 콘크리트 모델

3.4.1 균열직각방향의 인장강성모델

unloading 및 reloading에 대한 인장강성모델은 Tamai 등이 제안하고 있는 모델을 기본적으로 수용하였다. Tamai 등은 Fig. 6에서와 같이 철근콘크리트 봉요소의 반복실험을 수행하여, 콘크리트에 발생하는 응력은 철근과의 부착작용에 의해서 발생하는 것과 균열면에서의 접촉에 의해서 발생하는 것과의 합으로 고려하여, unloading 및 reloading에 대한 인장강성 모델^(10,11,12)을 제안하고 있다

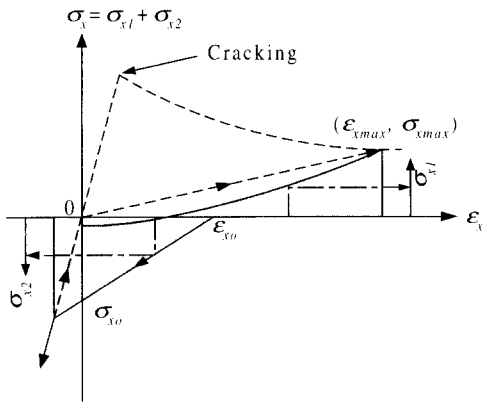


Fig. 6 Tension stiffness model for loading, unloading and reloading⁽¹⁶⁾

3.4.2 균열평행방향의 압축강성모델

본 연구에서는 구속된 콘크리트의 압축강성 모델로서, 균열발생으로 인한 강성의 저하를 콘크리트의 파괴진전을 표시하는 파괴파라메타를 감소시킴으로서 표현하고 있는, Okamura 등이 제안한 수정Maekawa모델(수정탄소성 파괴 모델)^(13,14)을 수정하여 적용하였다. 단, 재하시의 구속된 콘크리트의 초기강성은 구속되지 않은 경우의 초기강성과 동일한 것으로 가정하였다.

unloading 및 reloading시에 있어서도 탄소성 파괴모델의 기본적 개념에 의해서 표현된다. 즉, unloading · reloading에서의 파괴는 진전되지 않기 때문에, 파괴파라메타 및 소성변형도는 변화없이 선형적인 거동을 나타낸다. 이것은 unloading · reloading에 의해 에너지가 소산되지 않음을 의미하며, 콘크리트의 압축변형에 의한 에너지소산이 전체에너지의 소산에 비해 아주 작은 경우에는 계산이 간단해지는 장점이 있다. 단, 콘크리트에 높은 압축응력이 작용하는 경우에는 콘크리트의 압축변형에 의한 에너지의 소산은 전체 에너지의 소산에 비해 무시할 수 없게 된다.

unloading · reloading의 에너지소산을 합리적으로 표현하기 위해서는 반복재하에 의한

내부손상의 증가를 모델화할 필요가 있으나, 본 연구에서는 Fig. 7과 같이 unloading시의 응력-변형도곡선을, unloading개시점에서 접선강성이 무한대가 되며, 잔류변형도 지점을 통과하는 원호의 형태로 수정함으로써 에너지소산을 표현하였다. 이는 기왕의 실험결과로부터 unloading곡선의 곡률이 대략 원호의 형태로 나타남을 알 수 있기 때문이다.

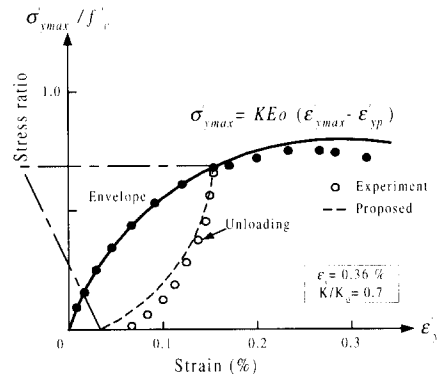


Fig. 7 Compressive stiffness model for unloading⁽¹⁶⁾

3.4.3 균열면에서의 전단전달모델

본 연구에서는 균열면에 대한 전단응력의 전달기구에 관해서는 Li · Maekawa가 제안하고 있는 접촉면밀도함수에 바탕을 둔 콘크리트 균열면의 응력전달 구성⁽¹⁵⁾을 기본적으로 수용하였다. 이는 균열면형상을 3개의 파라메타 (ω, δ, θ_s)로 표현하고, 접촉면에서 탄소성 응답을 가정하고 있어서 loading · unloading · reloading과 같은 임의 하중이력에 대해서 높은 적용성을 가지고 있다.

unloading 및 reloading에 대해서 Shin 등은 Li · Maekawa의 제안식 및 실험데이터에 근거한 다수의 재하이력에 대해 파라메타해석을 수행하여, 유한요소해석에 응용하기 쉽고 더욱 간단한 전단전달 모델을 개발하였다.⁽¹⁶⁾ 해석의 파라메타로서는, 균열폭(ω), 미끄러짐

(δ) 그리고 이들의 비 $\beta(\beta = \delta / \omega)$ 를 설정하였고, 단조재하시의 해석모델과 같이 분산균열 모델의 평균변형도의 개념을 도입하여, unloading · reloading에 대한 전단전달모델 적용하였다.

3.5 철근콘크리트에 대한 철근 모델

철근이 항복하기 전에는 unloading · reloading에 있어서도 철근은 탄성적으로 거동하기 때문에 철근의 평균응력-평균변형도관계는 탄성적관계를 유지하지만, 철근이 항복하게 되면, 그 탄성적인 관계는 상실되고 만다. 철근의 평균응력-평균변형도관계도 비선형성을 갖게 된다. 항복후의 unloading · reloading에 대한 균열 사이의 철근의 응력분포 및 철근만의 응력-변형도관계가 구해지면 항복후의 unloading · reloading에 대한 철근의 평균응력-평균변형도관계도 구할 수가 있다. Tamai 등은 균열사이의 철근응력분포를 정현곡선으로 가정하고, 또 반복재하시에 대한 철근만의 모델로서 Kato모델⁽¹⁷⁾을 사용하여 반복하중을 받는 철근콘크리트 봉요소의 역학적거동을 추적하였다.⁽⁴⁾ 그러나, 이 방법은 많은 계산시간이 소요되기 때문에 Kato모델의 철근응력을 철근의 평균응력으로, 철근의 변형도를 철근의 평균변형도로 치환하여 위의 봉요소를 해석하였고, 이 방법의 타당성을 봉요소의 실험결과와 비교함으로써 입증하였다.(Fig. 8)⁽¹⁸⁾ 본 연구에서는 이 모델을 간단하고 충분한 정확도를 갖는 것으로 판단하여, unloading · reloading에 대한 항복후의 철근모델로서 수정Kato모델을 사용하였다.

4. 접합요소(joint element)의 모델

철근콘크리트부재는 일반적으로 벽판(wall), 보(beam), 기둥(column) 등과 같은 기본구조부

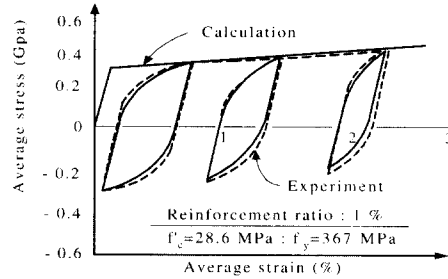


Fig. 8 Steel reinforcement model under cyclic loading⁽⁴⁾

재의 집합체로서 구성되어 있기 때문에, 철근콘크리트 부재의 유한요소해석도 철근콘크리트 요소를 조합하여 구성함으로써 해석이 가능하다. 단, Fig. 9와 같이 부재 두께가 서로 다른 부재간의 접합부에서는, 단면강성이 급변함에 따라 철근의 인발이나 접합면의 미끄러짐, 접합면의 관입 등의 국소적인 불연속변형이 집중하기 때문에, 이들의 국소적인 불연속변형을 해결하기 위한 접합요소(joint element)를 도입할 필요가 있다.

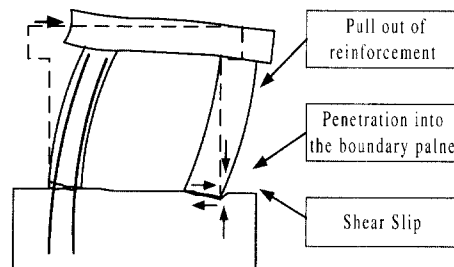


Fig. 9 Localized discontinuous deformations in boundary plane⁽¹⁶⁾

4.1 철근의 인발에 대한 해석모델

철근의 인장에 의한 기초로 부터의 철근의 인발에 관한 해석모델은 Shima(島) 등이 제안하고 있는, 정착길이가 긴 경우의 철근의 변형도-미끄러짐 관계식⁽¹¹⁾을 사용하였다. 이 관계식은 철근 자유단의 미끄러짐이 무시되도록 정착길이가 비교적 긴 경우에, unloading 및 reloading의 전 재하경로에 대해서 철근의 변형도-미끄러짐 관계를 동시에 구할 수 있으며, 철근의 축방향응력-부착응력 관계식을 사용할 필요가 없고, 직접 접합요소의 모델로 이용할 수가 있어서 해석의 정도를 향상시킬 수가 있다.

반복하중을 받는 철근콘크리트 부재에는 높은 인장응력, 압축응력 및 전단응력을 번갈아 받는 경우가 일반적이므로 그러한 부분의 콘크리트는 손상을 입게 되며, 부착력의 저하가 발생한다. 본 연구에서는, 부착력의 저하구간을 설정하여, Shima(島) 등의 제안모델에 부착력의 저하구간을 설정하여, 철근의 직경, 철근의 항복강도 및 콘크리트의 강도를 파라메타로 하여 많은 경우에 대한 해석결과로부터 제안된 철근의 변형도-미끄러짐 관계를 적용하였다.⁽¹⁶⁾ unloading시에 대한 철근의 변형도-미끄러짐관계는 Shima(島) 등의 제안식을 적용하였고, reloading시에 대한 곡선은 Fig. 10에 나타난 단순 2차곡선을 사용하였다.

철근 항복후에 철근만의 응력-변형도 관계는 Shima(島) 등의 제안모델⁽¹¹⁾을 사용하고, 반복재하시의 철근모델은 Kato모델⁽¹⁷⁾을 사용하였다. 이상의 모델을 접합요소의 특성으로서 사용할 때, 미끄러짐 s 를 요소의 상대자유도로 취하고, 대응하는 철근응력을 접합요소의 연직방향의 저항력으로 하였다. 또한 철근의 응력은 상기 모델의 변형도 ϵ_s 보다는, 철근의 구성방정식을 통해서 고려할 수 있도록 하였다.

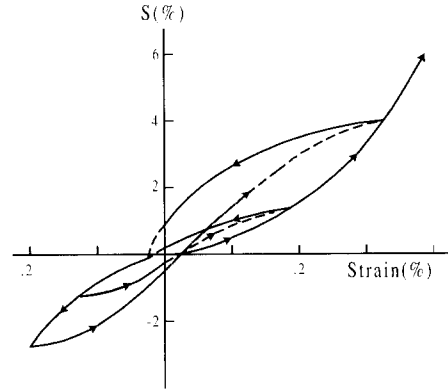


Fig. 10 Strain-slip relationship of reinforcement with respect to the present model for unloading and reloading⁽¹⁶⁾

4.2 접합부의 콘크리트에 대한 모델

부재의 두께가 서로 다른 부재 접합부의 부근에서는 두께 방향으로의 응력이 3차원적으로 분포하게 된다. 따라서, 부재의 두께에 따른 응력이 균일하다고 하면, 접합부의 변형은 실제보다도 적은 값을 나타내게 된다. 또한, 큰 전단력이 기초와 기둥 혹은 벽체의 접합면에 작용하는 경우에는, 접합면에서의 미끄러짐에 의한 변형도 전체부재의 변형에 비해 무시할 수 없게 된다. 이와 같은 국소적인 응력에 의해 부가되는 접합부에서의 변형은 접합면에서의 관입에 대한 모델 및 접합면의 전단변형에 대한 모델화로 표현하였다.

3차원적인 응력 분포에 의해 부가되는 접합면에서의 관입을 2차원 해석에서 고려하기 위해서, 본 연구에서는 접합면이 가상의 높이 h_s 를 갖고 압축응력에 저항하여 접합면이 변형한다고 가정함으로써 3차원적인 응력분포의 영향을 간접적으로 고려하였다.⁽¹⁶⁾

콘크리트의 압축강성에 대한 모델은 Maekawa 등의 탄소성과파괴모델에 구속효과를 고려할 수 있도록 수정하여 적용하였다. 단, 접합요소의 압축파괴는 발생하지 않는다고 가정한다. 접합면의 압축응력 σ_c 와 변위 w 와의 관계는 탄소성과파괴모델의 압축변형도 ε 를 접합부에서의 압축변위 w 로 치환하므로써 다음식과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \sigma_c &= E_o \cdot K \cdot (\varepsilon - \varepsilon_p) \\ &= E_o \cdot K \cdot \frac{(\omega - \omega_p)}{h_i} \\ &= KE_o \cdot K \cdot (\omega - \omega_p) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, KE_o 는 접합부의 초기압축강성, ω 와 ω_p 는 압축변위와 소성변위를 각각 나타내며, K 는 파괴파라미터를 나타낸다.

접합면의 전단변형은 일반적으로 접합면에서의 미끄러짐에 의한 변형을 나타낸다. 그러나, 부재 두께가 서로 다른 부재 접합부의 부근에서는 국소적인 응력이 발생하기 때문에, 이로 인한 변형이 부가된다. 따라서, 본 연구에서는 접합면의 전단 변형 δ 를 접합면에서의 미끄러짐 δ_{cr} 과 국소적인 응력에 의해 부가된 전단 변형 δ_m 과의 합으로써 고려하였다. 접합부의 전단응력 τ_c 와 전단변위 δ 와의 관계는 접합면에서의 전단강성에 대한 모델로서 철근콘크리트 판요소의 모델에 사용된 Li·Maekawa모델⁽¹⁵⁾을 적용하였다.

unloading 및 reloading시에 대한 관계식은 철근콘크리트 판요소의 모델에 대한 제안식을 사용하고, 이 제안식에서의 γ_{xy} 를 δ 로, ε_x 를 w 로 치환하므로써 구할 수 있다.

$$\tau_c = K_{stf} \cdot \delta \quad (5)$$

$$\sigma_{cs} = -f_{sk} \cdot \left(\frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \left(-\frac{1}{\beta} \right) - \frac{\beta}{1 + \beta^2} \right) \quad (6)$$

여기서, K_{stf} = 접합부의 전단강성

$$f_{sk} = 18 \cdot f_c^{0.333}$$

$$\beta = \sqrt{\tau_c / (f_{sk} - \tau_c)}$$

5. 비선형 해법 및 기준균열의 변경

본 연구에서 제안한 반복하중을 받는 철근콘크리트요소에 대한 해석모델들을 유한요소법을 사용하여 철근콘크리트부재의 해석프로그램 『RCSD-con』를 작성하였다. 비선형 해석에 있어서는 매 하중증분의 처음 3번의 반복과정까지는 강성의 변화가 큰 것이 일반적이므로, Newton-Raphson법을 적용하고, 그 후의 수렴과정에서는 강성의 변화가 크지 않으므로 초기강성법을 적용하여 안정된 수렴결과를 얻도록 하였다. 단, 균열의 발생이나 개폐, 하중경로의 변화등이 발생하는 경우 등 강성이 급격히 변화할 때에는 강성매트릭스를 재구성하는 것으로 하였다.

반복하중을 받는 철근콘크리트요소에는 2방향의 균열이 발생하는 것이 일반적이며, 본 연구의 재료모델은 발생한 균열을 기준으로 하는 직교이방성모델을 적용하고, 재료모델에서 콘크리트의 응력을 구할 때, 사용한 균열에 따라 콘크리트의 응력은 달라진다. 본 연구에서는 제 1 및 제 2방향의 균열에 대해서 콘크리트의 변형에너지를 구하여 비교하고, 변형에너지가 적어지거나 균열폭이 큰 균열을 응력산정을 위한 기준균열로 수용한다. 또한 계산의 간략화와 더불어 안정된 수렴해를 얻기 위해서 기준으로 하는 균열의 변경을, 하중스텝에서의 수렴해를 만족하는 반복계산루틴에서는 행하지 않으며, 수렴해가 얻어진 다음의 하중 단계로 이동할 때에 각 균열직각방향의 콘크리트의 변형도를 비교하고, 기준으로 하는 균열직각방향의 변형도가 그 외의 균열보다도 작게 되었을 때에 행하는 것으로 하였다(Fig. 11).

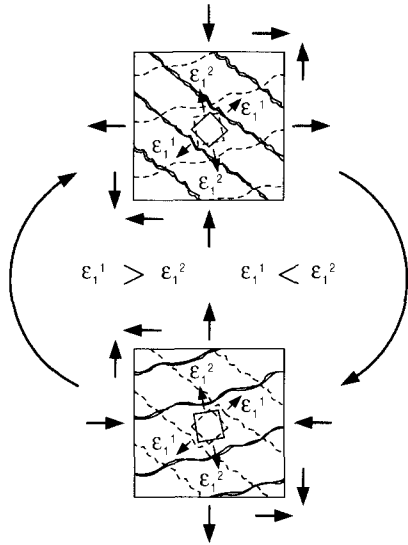


Fig. 11 Shift of reference crack

6. 수치예제 및 고찰

철근콘크리트 부재에 대해서 본 연구에서 제안한 해석기법의 타당성을 검증하기 위해서 Fig. 12에 나타난 것과 같은 시험체⁽³⁾를 선정하였다. 이 실험은 정방향의 철근콘크리트 기둥에 배근된 횡방향 구속철근의 구속효과를 조사하기 위한 것으로서, 시험체별로 구속철근의 배근형태를 Fig. 12에서와 같이 3가지의 형태로 하였으며, 종방향 철근비는 모든 시험체에 있어서 동일하다. 이 시험체에 대한 제원을 Table 1에 나타내었다. 시험체 U6와 U7은 횡방향 철근의 간격은 동일하게 유지하면서, 전단저항력(shear capacity)은 U3와 동일하도록 $A_{s,ft}/s$ 를 일정하게 하였으며, 여기서 $A_{s,ft}$ 는 간격 s 내의 총 횡방향 철근의 단면적을 나타낸다.

이들 시험체에 대한 재하방법은 Fig. 13에 나타난 것과 같다. 시험체의 바닥과 기둥사이에는 완전고정으로 하였으며, 모든 시험체에는 두 개의 hydraulic jacks에 의해서 600kN(61.2 ton)의 일정한 압축하중을 가한 상태에서, 횡

방향으로는 250kN MTS actuator에 의해서 변위를 가한 경우이다.⁽³⁾

이 시험체들의 유한요소해석에는 8절점 등매개요소를 사용하여 3점 가우스적분을 적용하였다. 또한, 하중이 재하되는 상부 보의 경우에는, 실험에서와 동일한 조건을 부여하기 위하여 균열이 발생하지 않는 탄성요소를 사용하였다. 또한, 실험의 경우에는, 부재가 외형상으로 완전히 파괴될 때까지 재하 하였으나, 본 연구의 해석프로그램의 해석상 파괴기준은 콘크리트 및 철근의 극한 변형률에 두고 있으므로 최대하중을 넘게 되면 파괴 하는 것으로 간주하였다.

Fig. 14~Fig. 17은 본 연구의 해석모델을 적용한 유한요소해석과 실험에 의한 하중-변위 관계를 나타내고 있다. 여기서 시험체 U3의 경우에는, TABLE 2의 (1)에서와 같이 구속된 경우의 최대강도가 구속되지 않은 경우보다도 작게 나타나고 있어서, 이론상 불가능한 경우가 되고 있다. 더욱이 (2) 및 (3)에서와 같이 다른 연구자들의 해석결과도 최대강도가 증가됨을 보여주고 있고, 본 연구의 해석결과가 이들의 결과와 잘 일치함을 볼 때, 본 해석에 의한 결과가 타당성이 있는 것으로 사료된다. 단, 그림에서 알 수 있는 것처럼, 약간의 균열이 발생한 상태에서의 강성은 실험결과와 비교할 때, 전체적으로 다소 크게 평가 되고 있다.

Fig. 18~Fig. 21은 해석에 의한 요소의 각 가우스점에서의 균열 발생 상황을 실험결과와 비교한 그림이다. 네 개의 시험체 모두, 기둥과 바닥사이의 접합면 부근에서 전단파괴하였고, 본 해석결과에서도 파괴형태를 잘 예측하고 있다.

본 연구의 해석에 의한 최대하중을 실험과 함께 다른 연구자들의 해석결과와 비교하여 Table 2에 정리하였다. TABLE 1에서 (1)은 동일한 시험체에 대해서 횡방향 철근이 배근되지 않은 경우에 Ozcebe 등⁽³⁾의 해석 결과이고,

(2)와 (3)은 각각 수정 Kent and Park⁽¹⁹⁾모델 및 Sheikh and Uzumeri⁽²⁰⁾이 제안한 모델에 의한 해석결과이다. 구속된 경우에 대해서, 본 해석에 의한 최대하중 (4)은 실험결과와 잘 일치하고 있으며, 다른 두 연구자들의 해석결과와도 좋은 일치를 보여주고 있다. (5)는 구속X

되지 않은 경우에 대한 본 연구의 해석 결과이며, 구속철근으로 인하여 부재의 최대강도는 약 13~20%까지 증가함을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 제안한 해석모델은 횡방향 철근에 의해서 구속된 콘크리트 부재의 전체적인 거동을 잘 표현하고 있다.

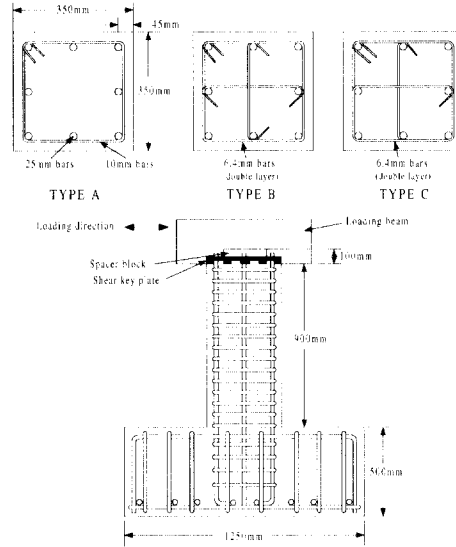


Fig. 12 Geometric details of test specimens

Table 1 Properties of test specimens

Test specimen	Concrete strength kg/cm^2	Longitudinal steel		Transverse steel				
		f_{yt} kg/cm^2	ρ_l percent	f_{yt} kg/cm^2	ρ_t percent	s mm	Confinement configuration	$A_{stf_{yt}}/s$ kg/mm
U3	355	4466	3.27	4973	1.69	75	Type A	127.8
U4	326	4466	3.27	4973	2.54	50	Type A	191.7
U6	380	4456	3.27	4334	1.95	65	Type B	128.7
U7	398	4456	3.27	4334	1.95	65	Type C	128.7

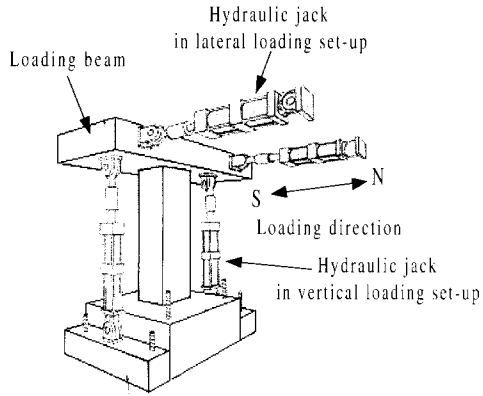


Fig. 13 Test setup

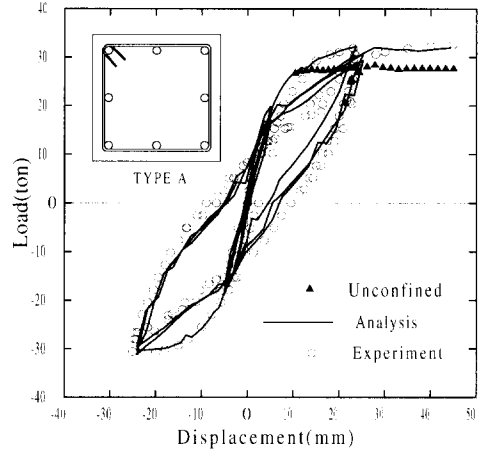


Fig. 15 Load-displacement curve for specimen U4

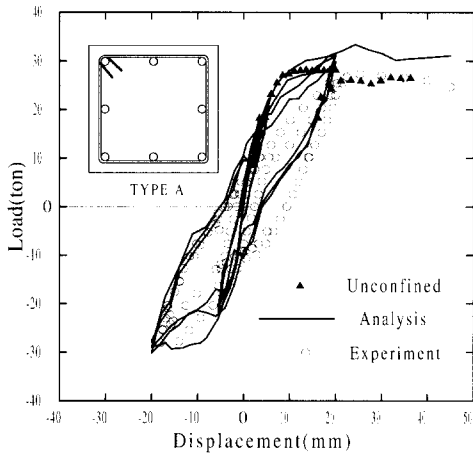


Fig. 14 Load-displacement curve for specimen U3

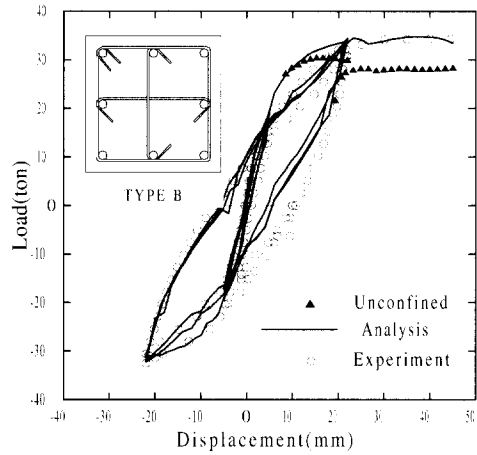


Fig. 16 Load-displacement curve for specimen U6

Table 2 Maximum shear strength by test and analysis

unit : ton

Test specimen	Test		Analysis			
	confined	unconfined (1)	Modified Kent and Park ⁽¹⁹⁾ (2)	Sheikh and Uzumeri ⁽²⁰⁾ (3)	This study	
					confined (4)	unconfined (5)
U3	27.3	30.6	33.1	35.6	33.4	29.6
U4	33.2	28.9	35.1	35.7	33.9	28.6
U6	35.0	31.1	34.3	37.3	34.8	30.6
U7	34.9	31.7	34.8	37.7	36.4	30.3

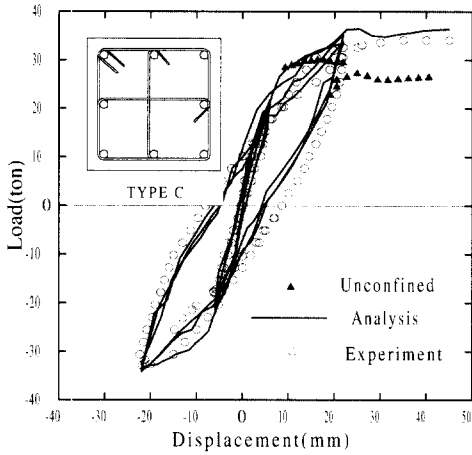


Fig. 17 Load-displacement curve for specimen U7

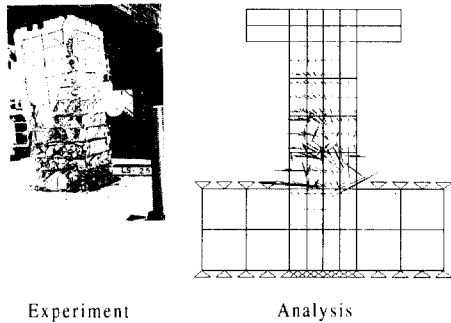


Fig. 18 Crack patterns of specimen U3

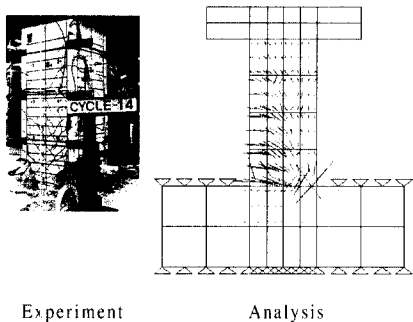


Fig. 19 Crack patterns of specimen U4

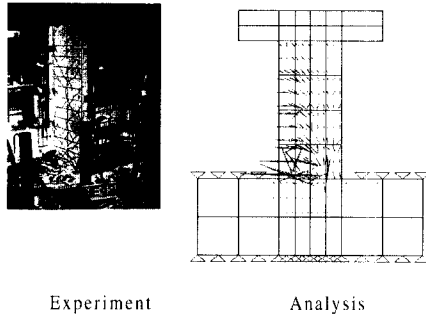


Fig. 20 Crack patterns of specimen U6

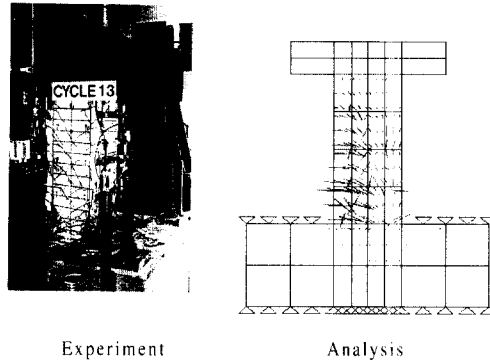


Fig. 21 Crack patterns of specimen U7

7. 결 론

본 연구에서는 철근콘크리트 부재의 항복후 파괴거동 및 역학특성을 표현하기 위한 해석 모델을 제안하였다. 제안된 해석모델을 적용한 평면 유한요소 해석프로그램을 사용하여, 반복되는 면내력이 작용하는 철근콘크리트 기둥부재를 해석하였다. 실험결과와 비교·검토된 수치예제로부터, 본 연구에서 제안한 해석모델은, 구속철근으로 인한 효과를 포함한 부재의 전체적인 거동특성을 바르게 표현하고 있으며, 이것은 실험결과 및 타 연구자들의 해석결과와의 비교를 통하여 입증되었다.

또한, 횡방향으로의 구속철근으로 인한 최대

강도는 구속되지 않은 경우에 비하여 약 13~20 %정도 증가하였으며, 실험과도 잘 일치하였다. 이것은 횡하중에 저항해야 하는 기둥부재의 반복거동을 제대로 평가함으로써, 단조증가하중에 대한 해석 또는 실험으로 제한되었던 부재의 강도를, 유한요소 해석만으로도 예측이 가능하였다.

감사의 글

본 연구는 서울대학교 지진연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금에 의한 것입니다.

참고 문헌

1. 土木工學研究會, 콘크리트構造物の耐震設計, 東京大學工學部土木教室, 第8回, 1995.
2. Sheikh, S. A., and Uzumeri, S. M., "Strength and ductility of tied concrete columns," *J. Struct. Div.*, ASCE, Vol. 106, ST5, May 1980, pp. 1079-1102.
3. Ozcebe, G., and Saatcioglu, M., "Confinement of concrete columns for seismic loading," *ACI Structural Journal*, July-August, 1987, pp. 308-315.
4. 岡村甫, 前川宏一, 鐵筋콘크리트의非線形解析と構成則, 技報堂出版, 1991.
5. Comitè Euro-International du Béton, RC Elements under Cyclic Loading, *State of the Art Report*, CEB, 1996.
6. Mander, J. B., Priestley, M. J. N., and Park R., "Theoretical stress-strain model for confined concrete," *J. Struct. Div.*, ASCE, Vol. 114, No. 8 August 1988, pp. 1804-1826.
7. Maekawa, K., and Okamura, H., "The deformational behavior and constitutive equation of concrete using elasto-plastic and fracture model,"

Journal of Faculty of Engineering, The University of Tokyo, Vol.37, No.2, 1983, pp. 253-328.

8. 二羽淳一郎, 鐵筋 콘크리트板要素의力學的性狀, 東京大學修士論文, 1980.
9. 山田一字, 面内力を受ける鐵筋콘크리트のせん斷傳達機構及び耐力・變形に關する研究, 東京大學學位論文, 1981.
10. 玉井眞一, 鐵筋降伏後及び交番載荷時における鐵筋콘크리트要素의引張構成モデル, 東京大學修士論文, 1987.
11. Shima, H., Chou, L., and Okamura, H., "Micro and macro models for bond behavior in reinforced concrete," *Journal of the Faculty of Engineering, The University of Tokyo(B)*, Vol.39, No.2, 1987, pp. 133-194.
12. Shima, H., and Tamai, S., "Tension stiffness model under reversed loading including post yield range," IABSE Colloquium Delft, 1987, pp. 547-556.
13. Okamura, H., Maekawa, K., and Izumo, J., "RC plate element subjected to cyclic loading," IABSE Colloquium Delft, Vol.54, 1987, pp. 575-590.
14. 出雲淳一, 島 弘, 岡村 甫, 面内力を受ける鐵筋콘크리트板要素의解析モデル, 콘크리트工學, JCI, Vol.25, No.9, 1987, pp. 107-120.
15. 李 寶祿, 前川宏一, 接着面密度函數に基づく콘크리트ひびわれ面の應力傳達構成式, 콘크리트工學, JCI, Vol.26, No.1.
16. 申鉉穆, 繰り返し面内力を受ける鐵筋콘크리트部材의有限要素解析, 東京大學博士論文, 1988.
17. Kato, B., "Mechanical properties of steel under load cycles idealizing seismic action," *Bulletin D'Information* No.131, CEB, AICAP-CEB Symposium, Rome, 1979, pp. 7-27.

18. 玉井眞一, 鐵筋降伏後及び交番載荷時における鐵筋コンクリート要素の引張構成モデル, 東京大學修士論文, 1987.
19. Park, Robert, Priestley, M. J. Nigel and Gill, Wayne, D., "Ductility of square-confined concrete columns," *Proceedings*, ASCE, Vol. 108, ST4, Apr. 1982, pp. 929-950.
20. Sheikh, S. A., and Uzumeri, S. M., "Analytical Model for concrete confinement in tied columns," *Proceedings*, ASCE, Vol. 108, ST12, Dec. 1982, pp. 2703-2722.