

NASCOM에 의한 실험결과 예측

Verification of NASCOM: Nonlinear Finite Element Analysis for Structural Concrete

조순호*

Cho, Soon Ho

요 약

콘크리트 구조요소의 비선형거동을 예측하기 위하여 압축응력장 이론의 기본개념인 압축강도 연화 현상, 거시적 및 회전균열 모델을 고려한 유한요소 해석이 제시되었다. 수치해석상의 효율성 및 최대하중 이후의 거동에 주안점을 두어 초기재료 강성을 채택한 변위증분법 논리 및 빠른 수렴을 위한 Over-Relaxation 방법이 Isoparametric계의 8-Node 요소에 포함·유도 되었다.

상기에 근거하여 제작된 비선형 프로그램, NASCOM은 단조하중을 지지하는 콘크리트 구조요소의 내력, 변형특성, 균열 분포 상황 및 보강근의 항복 분포를 예측하는데 사용할 수 있다. NASCOM의 성능을 검토하기 위하여 이러한 목적에 빈번히 사용되는 Bhide의 판넬(PB21) 및 Leonhardt의 춤이 큰 보에 대한 해석이 실시되었다. 판넬에 대한 해석결과는 대체로 변형이력 및 강도가 강한 거동을 나타내는 반면에, 춤이 큰보에 대해서는 변형이력이 유연한 거동을 나타내고 있어, 향후 보다 정확한 결과를 예측하기 위해서는 콘크리트의 인장강화 및 압축강도 연화현상에 대하여 좀더 향상된 재료모델의 고려가 필요한 것으로 판단되었다.

Abstract

A finite element formulation based on the CFT(Compression Field Theory), considering the effect of compression softening in cracked concrete, and macro-scopic and rotating crack models etc., was presented for the nonlinear behaviour of structural concrete.

Considering the computational efficiency and the ability of modelling the post-ultimate behaviour as major concerns, the Incremental displacement solution algorithm involving initial material stiffnesses and the relaxation procedure for fast convergence was adopted and formulated in a type of 8-noded quadrilateral isoparametric elements.

The analysis program NASCOM(Nonlinear Analysis of Structural Concrete by FEM : Monotonic Loading) developed in this way enables the predictions of strength and deformation capacities in a full range, crack patterns and their corresponding widths, and yield extents of reinforcement. As the verification purpose of NASCOM, the predictions were made for Bhide's

* 정회원, 광주대학교 건축공학과 전임강사

• 본 논문에 대한 토의를 1996년 8월 30일까지 학회로 보내 주시면 1996년 10월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

Panel(PB21) and Leonhardt's deep beam tests. The predicted results shows somewhat stiff behaviour for the panel test, and vice versa for deep beam tests. More refining process would be necessary hereafter in terms of more accurately simulating the effects of tension-stiffening and compression softening in concrete.

Keywords : concrete, disturbed region, finite element method, nonlinear, shear

1. 서 론

1.1 연구배경 및 목적

콘크리트 평면요소의 비선형 해석을 위한 유한요소법의 개발은 근래에 이르기 까지 수많은 연구자들에게 도전의 대상이 되어왔으며, 그 결과 강성유도방법, 사용된 재료모델 및 요소형태에서 각기 그 특성을 달리하는 여러해석 모델이 제안되었다^(1,2). 이들 중 대다수의 해석 프로그램들은 고정균열(Fixed-Orthogonal) 모델을 채택하고 있는데, 이는 균열강도를 초과하는 가장 처음의 주응력 방향이 그 다음의 하중단계에서도 고정되어 유지되는 것을 의미한다. 연속적인 하중단계에서 균열된 콘크리트의 전단거동은 전단보유계수(Shear Retention Factor)를 적용하여 전단강성(Shear Stiffness)을 감소시키는 방법을 사용하고 있기는 하나, 초기에 고정된 주응력 방향과는 다른 방향에서 균열이 발생할 수 있는 가능성을 묘사할 수 없으므로, 이러한 모델에 의한 해석결과는 일반적으로 강한(Stiff & Strong) 거동을 나타낸다.

이에 반하여, 최근 북미(McGill & Univ. Toronto)에서 제시된 "콘크리트 주응력 방향은 주변형도 방향과 일치한다"는 압축응력장 이론⁽³⁾(Compression Field Theory : CFT)을 적용하면 하중이 진전됨에 따라 콘크리트 균열방향이 변화하는 회전균열(rotating 혹은 non-orthogonal)을 간단하게 묘사할 수 있게는 되었으나^(4,5,6), 이러한 회전균열 모델은 이미 초기에 형성된 균열방향이 변화하며, 또한 이와 관련된 재료성능이 새로운 방향에 의존한다는 사실이 "비현실적(Unphysical)"이라는 Bazant의 비평이 제기된 바 있다⁽⁷⁾. 그러나, 주 인장 변형도(principal tensile strain)의 방

향은 재료성능이 이전 균열에 영향을 받고 있는 현 단계에서 가장 지배적인 균열에 관계될 수 있다는 관점에서 현실적이며, 이는 또한 CFT에 의거하여 유도된 재료의 전단강성이 텐서(tensor) 상으로 불변량(invariant)을 나타내므로 이전의 균열과 일치한다는 관점에서 강하게 옹호되고 있다(실험적으로도 관측한 근거가 있음).

CFT에 근거한 이러한 회전균열 모델은 전단강성 유도시 동시에 발생하는 여러 균열(Multiple Simultaneous Cracks) 효과를 무시하고 있기는 하나, 현재까지는 실험결과와 비교하여 좋은 일치를 나타내고 있으므로 합리적인 모델의 하나로 인식되고 있다.

따라서 본 연구는 CFT 혹은 MCFT(Modified CFT)가 제시하는 콘크리트 재료모델의 기본개념인 회전균열(Rotational Crack) 모델 및 압축강도 연화(Compression Strength Softening) 현상을 고려하여, 변형후 평면이 유지되지 않는 응력 혼돈지역에 존재하는 콘크리트 구조요소의 해석에 일반적으로 적용될 수 있는 비선형 유한요소 해석프로그램, NASCOM(Nonlinear Analysis of Structural Concrete by FEM)을 개발하고 기존의 실험결과를 예측하여 그 효용성을 검증하고자 한다.

1.2 연구내용 및 범위

단조가력하의 하중 지지능력, 탄성범위 이후의 변형특성, 균열양상 및 보강근의 항복범위 등을 예측할 수 있는 콘크리트 비선형 해석 프로그램, NASCOM을 개발하기 위하여 본 연구에서는 분포된(Smeared), 회전균열 모델 및 압축강도 연화 현상을 고려한 콘크리트 재료 구성방정식을 채택하며, 이와 관련된 유한요소의 유도, 수치해석 기

법 및 전체 프로그램 해석논리를 설명한다(보다 자세한 설명은(8) 참조). 또한, NASCOM의 타당성을 검토하기 위하여 수 많은 연구자들에게 표준 시험체로 인정되어 오고 있는 다양한 실험결과와의 비교 검토 내용을 포함한다.

2. 균열된 콘크리트의 거동

2.1 압축응력장 이론

회전 균열모델을 적용하는데 있어 콘크리트의 완전 소성응력-변형도 관계(Perfectly Plastic Stress Relationship) 혹은 Kupfer⁽⁹⁾ 등이 제시한 2축-과괴범칙(Biaxial Yield Criteria)은 아직도 실험결과를 과대 평가하는 경향을 나타내고 있어 그 해결책을 모색하기에 이르렀는데, 그 중 하나의 방법은 CFT에서 제시하는 압축강도 변화 모델을 사용하여 과대한 강도를 감소시키는 것이다.

CFT/MCFT 이론은 기본적으로 힘의 평형(equilibrium) 및 변형도 적합조건(compatibility)을 만족하고 있으며, 또한 부가적으로 실제 상황과 유사한 조건의 실험결과로부터 유도된 합리적인 콘크리트 응력-변형도 관계-주인장변형도(principal tensile strain)의 크기에 따라 압축강도가 저하되는 압축강도 변화 현상을 포함하는 관계식을 사용하고 있다(Fig.1). 또한, 콘크리트의 주응력 방향은 주변형도의 방향과 일치한다고 가정하고, 모든 응력 및 변형도는 여러개의 균열을 포함하는 지역(Smeared Area)에 나타나는 평균값으로 고려된다.

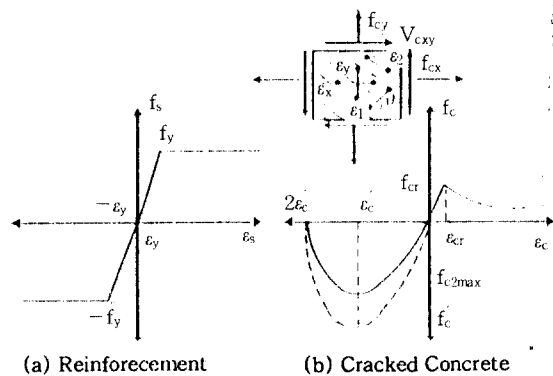


Fig.1 Constitutive Relationships of MCFT

다음은 주어진 변형도 $\epsilon_x, \epsilon_y, \gamma_{xy}$ 로 부터 평균 철근응력 f_{sx}, f_{sy} 및 콘크리트 주응력 f_{c1}, f_{c2} , 그리고 이들의 조합응력인 f_x, f_y, v_{xy} 를 구하는 일련의 MCFT 단계를 나타내고 있다.

단계 1 : 주어진 변형도 ϵ_x, ϵ_y 및 Fig.1(a)로 부터 철근응력 f_{sx}, f_{sy} 산정

$$f_{sx} = E_s \epsilon_x, f_{sy} = E_s \epsilon_y \quad (1)$$

$$E_s = \text{철근의 탄성계수}$$

단계 2 : 주어진 변형도($\epsilon_x, \epsilon_y, \gamma_{xy}$)로 부터 주변형도($\epsilon_1, \epsilon_2, \theta$) 산정

$$\epsilon_1 = \epsilon_x \cos^2 \theta + \epsilon_y \sin^2 \theta + \gamma_{xy} \sin \theta \cos \theta$$

$$\epsilon_2 = \epsilon_x \sin^2 \theta + \epsilon_y \cos^2 \theta - \gamma_{xy} \sin \theta \cos \theta \quad (2)$$

단계 3 : 콘크리트 주응력도 방향(θ_c)과 주변형도 방향(θ)이 일치한다고 가정($\theta_c = \theta$)

단계 4 : 주변형도(ϵ_1, ϵ_2) 및 Fig.1(b)로 부터 콘크리트 주응력도(f_{c1}, f_{c2}) 산정

$$f_{c1} = f_{cx} \cos^2 \theta + f_{cy} \sin^2 \theta + 2v_{cxy} \sin \theta \cos \theta$$

$$f_{c2} = f_{cx} \sin^2 \theta + f_{cy} \cos^2 \theta - 2v_{cxy} \sin \theta \cos \theta \quad (3)$$

$$f_{c2} = f_{c2max} [2(\epsilon_2 / \epsilon_c) - (\epsilon_2 / \epsilon_c)^2]$$

여기서

$$f_{c2max} = f_c' / [0.8 - 0.34(\epsilon_1 / \epsilon_c)] \leq f_c' \quad (4)$$

$\epsilon_1 \leq \epsilon_{cr}$ 일때

$$f_{c1} = E_c \epsilon_1, E_c = 2 f_c' / \epsilon_c, \epsilon_{cr} = f_{cr} / E_c$$

$\epsilon_1 > \epsilon_{cr}$ 일때

$$f_{c1} = f_{cr} / [1 + \sqrt{(200\epsilon_1)}] \quad (5)$$

f_c' = 콘크리트 압축강도

f_{cr} = 콘크리트 균열강도

ϵ_c = 콘크리트 압축강도에 일치하는 변형도

ϵ_{cr} = 콘크리트 균열강도에 일치하는 변

형도

E_c = 콘크리트의 탄성계수

단계 5 : 균열발생 위치에서 콘크리트 평균 인장응력 전달 여부 검토

$$f_{c1} \leq \rho_{sx}(f_{yt} - f_{sx})\cos^2\theta + \rho_{sy}(f_{yt} - f_{sy})\sin^2\theta \quad (6)$$

$f_{yx}, f_{yy} = x, y$ 방향에 각각 배근된 철근의 항복 응력도

$\rho_{sx}, \rho_{sy} = x, y$ 방향에 배근된 철근비

단계 6 : $(f_{c1}, f_{c2}, \theta_c, f_{sx}, f_{sy})$ 로 부터 XY 좌표상의 최종 응력 산정(f_x, f_y, v_{xy})

$$\begin{aligned} f_x &= f_{cx} + \rho_{sx}f_{sx} \\ f_y &= f_{cy} + \rho_{sy}f_{sy} \\ v_{xy} &= v_{cxy} \end{aligned} \quad (7)$$

단계 3에서 제안된 식(4)는 압축강도 연화에 영향을 미치는 주변수로서 최대 주응력을 고려하거나, 경사진(skewed) 보강근, 하중조건 및 고강도 콘크리트의 영향을 포함하는 여부에 따라 여러 연구자들에 의해 제안된 다수의 수정된 식들이 존재하며, 새로운 실험자료가 첨가됨에 따라 그 적용범위를 확장하기 위하여 지속적으로 수정 또는 정제(refining) 도중에 있다. 또한 단계 5에서 f_{c1} 은 균열면의 골재 상호작용(Aggregate Interlock) 능력에 따라 제한되기도 한다.

2.2 콘크리트 및 보강근

Fig.2(a)는 본 연구에서 채택한 균열 콘크리트의 압축 응력-변형도 관계를 나타내며, CFT의 단순한 2차곡선 대신에 증가된 변형 능력을 포함하고 있다. 좌표(ϵ_c, f_c)에 도달하기까지는 CFT에서 제시하는 2차곡선과 동일하나, 그 이후 하락 부분에서는 $(-0.01, 0.3f_{c2max})$ 에 이르기까지 선형적으로 변형도가 감소하며 그 이후의 변형도에도 $3f_{c2max}$ 의 응력도를 유지하고 있다. 이러한 응력-변형도 관계는 추후 Confine된 콘크리트의 재료 모

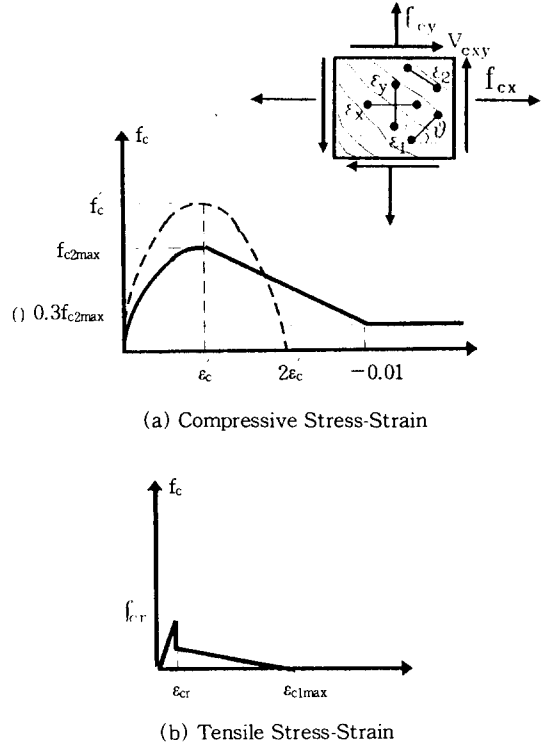


Fig.2 Constitutive Relationships for Cracked Concrete

델에도 적용될 예정이다.

콘크리트의 인장 응력-변형도는 본래의 CFT 모델 이외에 Fig.2(b)와 같은 3차 선형관계식(Tri-Linear)을 추가하여 사용자의 선택에 따라 사용할 수 있도록 하였는데, 이는 CFT의 모델이 약간 강한 인장강도 강화(Tension-Stiffening) 현상을 내포하는 경향이 있기 때문이다. 좌표(ϵ_{cr}, f_{cr})까지의

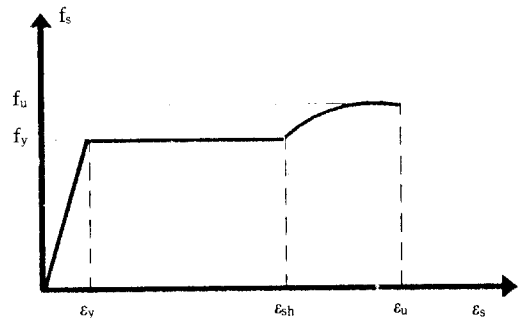


Fig.3 Stress-Strain Relationship for Reinforcement

응력-변형도 관계는 CFT와 동일하며, 그 이후에는 불연속 감소하고, 또한 최대변형도(ϵ_{1max})에 도달하기 까지 점증적으로 선형 감소한다.

보강근의 경우 CFT에서는 2차 선형식에 근거한 응력-변형도 관계가 사용되었으나 본 연구에서는 변형경화 현상을 고려할 수 있도록 좌표(ϵ_{sh} , f_y)에서 최대 응력 및 변형도를 나타내는 좌표(ϵ_u , f_u)에 이르기 까지 회기분석에 의한 포물선 식이 사용되었다(Fig.3).

3. 회전 균열모델

3.1 재료의 강성

주변형 및 응력도 방향의 일치성을 포함하는 회전 균열모델에 의한 재료의 강성은 다음과 같이 표현될 수 있다. 하중 및 변형증분에 따른 콘크리트 재료의 비선형 강성(Tangent Stiffness)은 XY 좌표계 및 식(3)과 (7)로 부터 아래와 같이 유도 될 수 있다(5,6).

$$\begin{bmatrix} \Delta f_{cx} \\ \Delta f_{cy} \\ \Delta V_{cxy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{xx} & E_{xy} & E_{xy} \\ E_{yx} & E_{yy} & E_{yy} \\ E_{vx} & E_{vy} & E_{vy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \epsilon_x \\ \Delta \epsilon_y \\ \Delta \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서 $E_{xx} = \partial f_{cx} / \partial \epsilon_x = \partial f_{cx} / \partial \epsilon_1 \cdot \partial \epsilon_1 / \partial \epsilon_x + \partial f_{cx} / \partial \epsilon_2 \cdot \partial \epsilon_2 / \partial \epsilon_x + \partial f_{cx} / \partial \theta \cdot \partial \theta / \partial \epsilon_x = c^4 E_{11} + s^2 c^2 (E_{21} + E_{12}) + s^4 E_{22} - c^3 s E_{1\theta} / D - s^3 c E_{2\theta} / D + 2s^2 c^2 (f_{c1} - f_{c2}) / D$ ($c = \cos \theta$, $s = \sin \theta$, $D = (\epsilon_1 - \epsilon_2)$, $E_{12} = \partial f_{c1} / \partial \epsilon_2$ 이며, E_{xy} , E_{xy} , ... 등에 대해서도 동일하게 정의 할 수 있다)

식(8)을 재료의 주축에 대하여 변환하면,

$$\begin{bmatrix} \Delta f_{c1} \\ \Delta f_{c2} \\ \Delta V_{c12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{11} & E_{12} & E_{1\theta} / 2D \\ E_{21} & E_{22} & E_{2\theta} / 2D \\ 0 & 0 & (f_{c1} - f_{c2}) / 2D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \epsilon_1 \\ \Delta \epsilon_2 \\ \Delta \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (9)$$

일반적으로 E_{12} 및 $E_{1\theta}$, $E_{2\theta}$ 는 0이 되나(포아손효과 무시) E_{21} 은 식(4)에 의해 ϵ_1 에 의존하므로 비대칭 강성 행렬이 형성된다. 이와같은 강성 행렬의 비대칭성을 배제하기 위하여 E_{21} 을 0의로 무시하

거나, 세칸트 계수(Secant Modulus) 개념을 사용하여 재료 강성의 대칭성을 확보하는데⁽⁶⁾, 이는 단지 수렴속도에만 그 영향을 미친다. 따라서, 본 연구에서는 초기 강성법을 채택하여 재료 강성행렬의 대칭성을 유지하고, 수렴비를 향상시키기 위하여 완화/가속(Relaxation) 방법을 사용하였다.

3.2 변위증분 해석논리

하중증분법은 구조물이 극한하중에 도달할 시(하중의 증가없이 변형만 증가되는 경우) 심각한 수치해석상의 어려움을 나타내며, 또한 주어진 하중단계에 있어서 하나 이상의 해가 존재하는 경우(Snap-Through 및 Multi-Solution Path 문제)에는 더 이상 적합하지 않게 된다. 본 연구의 경우 심각한 응력혼돈 지역을 내포하는 구조물의 경우 극한하중 이후 강도 저하가 예상되며, 또한 추후 고강도 콘크리트 사용의 경우 초기 균열 이후의 보유강도가 급격히 저하되므로 이러한 범위의 거동도 묘사할 수 있도록 변위 대신에 하중을 변수로 하는 변위증분법(Incremental Displacement Method)을 채택하였다. 이러한 해석논리의 접근 방법은 이미 잘 정립되어 있으며, 여러분야에 성공적으로 사용되고 있다.

변위증분법 및 반복계산에 근거한 비선형 해석논리가 효율적이기 위해서는 매 반복계산시마다 실질적인 수렴조건이 사용되어야 하는데 일반적으로 사용되는 수렴조건은 절점의 잉여력(Out-of-Balanced Force) 및 증분된 변위 등의 벡터 기준량(Norm)이다. 본 연구에서는 여러차례 수치해석을 실행한 후 그 결과를 참조하여 작용력의 증분량과 전체 작용력의 비를 수렴기준으로 채택하였으며, 수렴비(Convergence Rate)를 향상시키기 위하여 완화/가속(Over-Relaxation)계수를 증분된 변위에 첨가하는 방법을 사용하였다⁽⁹⁾. 변위증분법을 사용한 반복계산 논리는 아래와 같다.

단계 1 : 임의의 하중단계 j에서 (U_{j-1})의 성분 ℓ 을 알려진 값으로 치환

$$(U_{j-1})_\ell = \bar{U}_\ell \quad (10)$$

단계 2 : 반복계산 단계 i에서 잉여력 {R} 및 강성 [K] 산정

$$\{R(U_{j-1})\} = \lambda_{j-1}\{F_0\} + [K(U_{j-1})] \{U_{j-1}\}$$

$$[K(U_{j-1})] \{\Delta U_j^R\} = \{R(U_{j-1})\}$$

$$\{R\} = \text{잉여력}$$

$$[K(U_{j-1})] \{\Delta U_j^F\} = \{F_0\}$$

$$\{F_0\} = \text{작용력} \quad (11)$$

$$\Delta\lambda = -\frac{\Delta U_j^R}{\Delta U_j^F} \quad (12)$$

$$\{U_j\} = \{U_{j-1}\} + \omega\{\{\Delta U_j^R\} + \Delta\lambda\{\Delta U_j^F\}\},$$

$$\omega = \text{Over-Relaxation 계수} \quad (13)$$

$$\lambda_j = \lambda_{j-1} + \Delta\lambda$$

$$\lambda_j = \text{변위 증분 계수} \quad (14)$$

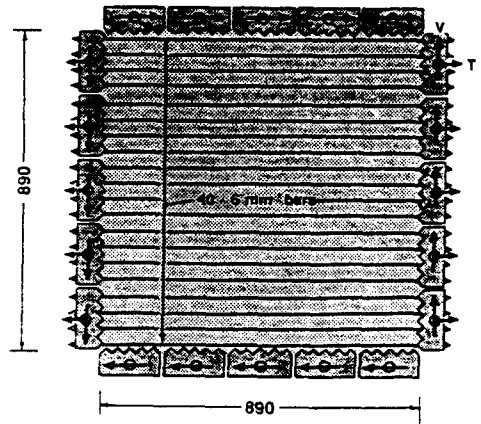
단계 3 : 수렴조건을 만족하면 단계 1로 나감

전절에서 설명한 재료의 구성 모델 및 비선형 방정식 해석논리를 고려하여 프로그램 NASCOM 이 제작되었다. 전체 프로그램 구성은 변위가 증분될 Control 절점이 선정되고 이에 따라 Control 절점의 작용력이 충분한 허용범위에 속할때 까지 반복 계산을 한다. 수렴조건이 만족되면, 주어진 Gauss Point에서 평균변형도($\epsilon_x, \epsilon_y, \gamma_{xy}$), 보강근의 응력(f_{sx}, f_{sy}), 콘크리트 주응력 및 방향(f_{c1}, f_{c2}, θ_c), 평균 균열폭(w) 등이 산정된다.

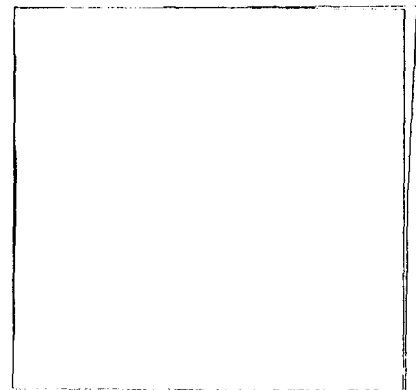
4. 실험결과 예측

NASCOM의 정확성을 평가하기 위하여 콘크리트 유한요소법의 표준 시험체로 사용되고 있는 Bhide⁽¹¹⁾의 판넬 및 Leonhardt⁽¹²⁾의 춤이 큰 보에 대하여 해석이 수행되었다.

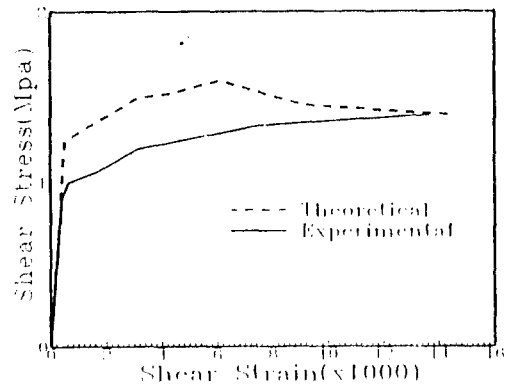
Bhide는 콘크리트 평면요소의 구조거동을 조사하기 위하여 여러 인장 및 전단하중 조건하의 판넬을 특별한 가력장치를 사용하여 실험한 바 있는데, 그 중 PB21는 수평방향으로는 철근이 많이 배근되었으나($\rho_x=0.02195$), 수직방향으로는 철근이 전혀 배근되지 않은 시험체로서 인장 : 전단하중 비는 3.1 : 1($f_x=3.1v_{xy}, f_y=0$)의 형상을 나타내고



(a) Test Specimen



(b) Deflected Shape

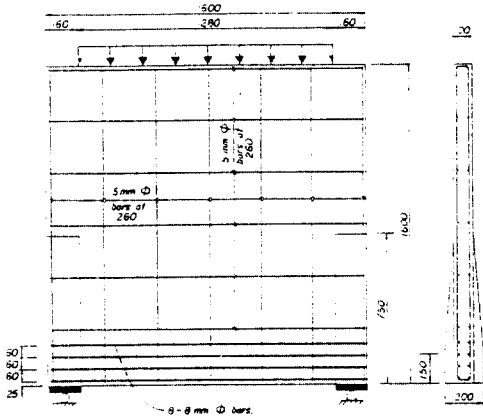


(c) Shear Stress-Strain Relationship

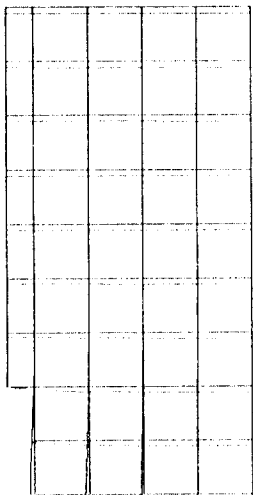
Fig.4 Bhide's Panel PB21

있다(Fig.4(a)). 재료성능 및 하중조건이 전 판넬에 균등하고, 또한 유한요소 수에 따른 해석결과

의 의존성을 부분적으로나마 제한하기 위하여 하나의 요소만을 사용하여 해석하였다(Fig.4(b)). 하지만, 해석시, 콘크리트의 인장강도 연화정도에 따른 유한요소 수의 조정이 고려되지 않았으므로 수치해석상의 불안정 요소를 내포하는 경향을 나타내었다. Fig.4(c)는 실험으로 부터 관측 및 NASCOM에 의해 예측된 전단응력-변형도 관계를 나타낸다. 초기 거동은 실험결과와 좋은 관계를 나타내고 있으나 균열 후에는 상당히 강한 거동을 나타내고 있다. 이는 아마도 1방향으로 배근된 시험체의 경우 극한강도 및 변형특성은 실제 균열응력 및 인장강화(Tension-Stiffening) 모델에 매우 민감하기 때문인 것으로 사료된다(본 해석의 경우 균열강도는 $0.33 \sqrt{f_c}$ 이 사용 되었음, $f_c=21.8\text{Mpa}$).

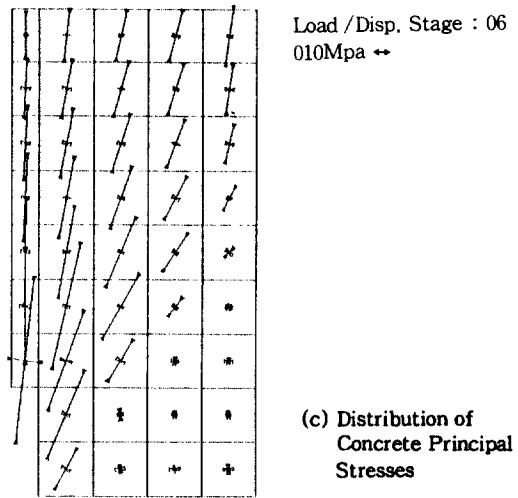


(a) Test Specimen

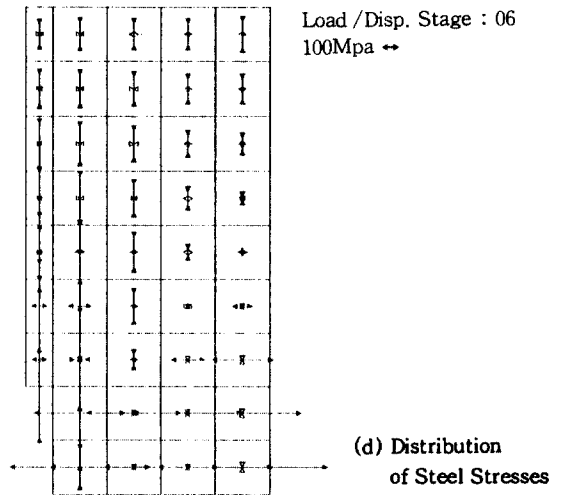


Deflected Shape
Load /Disp. Stage : 06

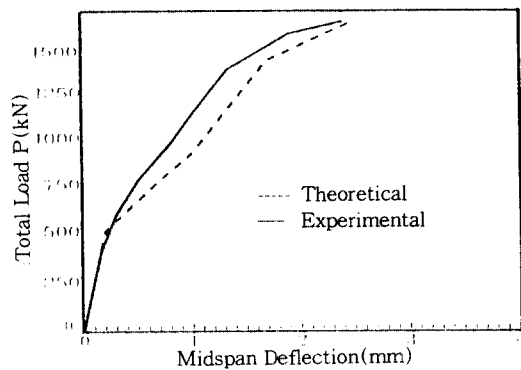
(b) Deflected Shape



(c) Distribution of Concrete Principal Stresses



(d) Distribution of Steel Stresses



(e) Load-Deformation Relationship

Fig.5 Leonhardt's Deep Beam

Leonhardt의 춤이 큰 보 시험체는 그림 5(a)와 같다($f_c=29.6\text{Mpa}$, $f_y=415\text{Mpa}$). 전단면에 걸쳐 수직방향 철근은 균등하게 배근되었으나($\rho_y=0.00175$), 수평방향 철근은 하부 및 상부에 각각 $\rho_x=0.001787$ 및 0.00175 로 배근되었다. 실험시 본 시험체는 균일하게 분포된 철근배근 형태를 포함하나, 시험체의 스펠/춤 비가 적으므로 응력이 심하게 혼돈되는 거동을 나타내어 지지점 부위에서 콘크리트 압괴에 의해 파괴되었다. 해석시, 응력 집중현상을 회피하기 위하여 하중 가력점 및 지지점을 탄성요소로 치환하여 작용력을 양쪽에 모두 적용하였다. 해석으로 부터 예측된 변형된 형상, 콘크리트 주응력 분포 및 철근의 응력상황은 5(b)-(d)와 같다. Fig.5(e)에서 보는 바와 같이 초기거동 및 내력은 정확히 예측하고 있으나 균열 하중 이후 유연한 변형 특성을 내포하고 있다. 이는 하중 작용점 및 반력점에 아마도 응력집중 현상이 완전히 배제되지 않았기 때문인 것으로 사료된다.

5. 결 론

일반적으로 해석 결과는 실험치 보다 강한(Stiff) 변형 특성을 나타내고 있기는 하나, 최대하중에서 PB21의 경우 실험치/이론치=1.4Mpa/6, 춤이 큰 보의 경우 실험치/이론치=1650kN/1652를 예측하고 있으며, 균열 전 후의 강성 등에서 Figs. 4(c) 및 5(e)와 같이 허용할 만한 관계를 보여주고 있다. 이와 같은 오차에는 콘크리트의 인장강도 모델(Tension-Stiffening) 이외에 철근의 과다한 변형경화 모델 및 실험에 관한 충분한 정보의 부족으로 정확한 실험상황(건조 수축과 같은 Prestrain 효과)이 좀 더 정확히 고려되지 못하였기 때문인 것으로 사료된다. 또한 초기강성법을 고려한 변위증분법 논리를 사용하므로써 PB21의 경우 최대하중 이후의 취성 변형 특성을 수치해석상의 어려움 없이 예측할 수 있었으며, 춤이 큰 보의 경우 예측된 주응력도 분포는 최근 합리적인 설계방법으로 인식되고 있는 스트럿-타이(Strut-and-Tie)모델에서 암시하는 하중점과 지지점을 연결하는 경사진 압축 스트러트 및 하부 지지점을

연결하는 수평 타이 작용을 충분히 묘사하고 있다.

현재까지의 NASCOM에 의한 제한된 수치해석 결과에 의하면, 대체적으로 허용할 정도의 하중 지지능력, 탄성범위 이후의 변형 특성, 균열양상 및 보강근의 항복범위 등을 예측하고는 있으나, 보다 정확한 예측을 위해서는 i)콘크리트 균열 발생 이후의 정확한 인장강도 모델 고려, ii)최대 압축강도 이후에서의 보다 신뢰성 있는 콘크리트 재료 구성 모델 정립 및 iii) 보다 합리적인 철근의 변형경화 모델 등이 우선적으로 보완될 사항으로 나타났다. 또 한편으로, 수치해석상의 측면에서 보면, 대칭성을 유지하는 등가 콘크리트 재료 강성을 유도하거나 혹은 이와 유사한 접근방법(Off-diagonal Term 무시 등)으로 재료의 비대칭성을 배제할 수 있다면, 곧바로 탄젠트 강성법을 적용하여 계산상의 효율성을 크게 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 지정 한양대학교 소재 "초대형 구조 연구센터"의 연구비지원으로 1995.3.-1996.2에 수행된 내용의 일부로서 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. ASCE Task Committee, *State-of-the-Art Report on Finite Element Analysis of Reinforced Concrete*, (ASCE, 1982), 545p.
2. ASCE / ACI 447, *Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures : Chapter 8*, (ASCE, 1991), pp.490-569.
3. Vecchio, F., Collins, M.P., *The Modified Compression Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear*, (ACI Structural Journal, 1986, Mar.-April), pp.219-231.
4. Cook, W.D., Mitchell, D., *Studies of Disturbed Regions Near Discontinuities in Reinforced Concrete Members*, (ACI Structural Journal, 1988, Mar.-April), pp.206-216.
5. Stevens, N.J., Uzumeri, S.M., Collins, M.P.,

- Will, G.T., *Constitutive Model for Reinforced Concrete Finite Element Analysis*, (ACI Structural Journal, 1991, Jan.-Feb.), pp.49-59.
6. Vecchio, F., *Reinforced Concrete Membrane Element Formulations*, (ASCE Structural Journal, 1990, Mar.), pp.730-750.
7. Bazant, Z.P., *Comment on Orthotropic Models for Concrete and Geomaterials*, (ASCE Engineering Mechanics Journal, 1983, June.), pp. 849-865.
8. 조순호, 압축응력장 이론을 적용한 콘크리트 유한요소법 개발, (전산공학회지, 1996, 3, 제출)
9. Kupfer, H., Gerstle, K.N, *Behavior of Concrete under Biaxial Stresses*(ASCE Engineering Mechanics Journal, 1973, Apr.), pp.852-866.
10. Ma, S.Y.A., May I.M., *The Newton-Raphson Method Used in the Non-Linear Analysis of Concrete Structures*, (Computers & Structures, 1986, Feb.) pp.177-185.
11. Bhide, S.B., Collins, M.P., *Reinforced Concrete Elements in Shear and Tension*, (Pub. No. 87-02, Dept. of Civil Engrg., Univ. of Toronto, 1987), 147p.
12. Leonhardt, Fritz, and Walther, Rene, *Wandartige Trager*(Bull. No. 178, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, 1966), 159p.

(접수일자 : 1996. 3. 26)