
경량콘크리트 보의 비선형 유한요소해석

The Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Lightweight Concrete Beam



이호경*

Lee, Ho-Kyung



곽윤근**

Kwak, Yoon-Keun

ABSTRACT

The paper presents a nonlinear analysis that can be applied to study the behavior of reinforced lightweight concrete structures. An attempt was made to develop a constitutive model of the reinforced lightweight concrete by using experimental biaxial information available for concrete. The concrete nonlinearities are reflected in the constitutive relation of plane stress by the strength magnification factor following the stress ratio and by the reduction factor which is accounted for the nonlinear material properties of concrete. Rectangular elements with eight-nodes are used for concrete structures and truss elements are adopted for reinforcing bars in finite element formulation. Numerical results obtained from the finite element analysis are compared favorably with the experimental data tested in the laboratory.

* 금오공과대학교 석사과정
** 정회원, 금오공과대학교 건축공학과 교수

• 본 논문에 대한 토의를 1998년 10월 30일까지 학회로 보내주
시면 1998년 12월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

1. 서론

최근 건축물이 고층화, 대형화함에 따라 콘크리트의 고강도화, 경량화, 고유동화등에 대한 연구가 활발히 진행중이다. 특히 경량화에 대한 연구는 경제성과 자원의 보존차원에서 구미지역을 중심으로 활발히 진행중이고, 실제 구조물에 적용사례도 상당히 증가하고 있다. 그러나 국내에서의 구조용 경량콘크리트 사용은 연구자료의 부족으로 인해 재료에 대한 신뢰도가 낮고 재료의 생산공급이 원활치 않아 실용화되지 않고 있는 실정이다. 하지만 경량콘크리트가 가지는 자중감소로 인한 경제성을 고려한다면 앞으로 그 수요가 많아질 것으로 기대된다.

본 연구는 보통중량콘크리트와 경량콘크리트의 특성을 분석하여 재료의 변화에서 발생하는 거동의 차이를 밝히고, 이를 이론적으로 분석하여 수치모델화하는 과정이 설명되어 있다. 그리고 그 결과를 본교 구조실험실에서 행해진 경량콘크리트에 대한 실험결과²⁾와 비교·검토함으로써 경량콘크리트 이론식의 적용성과 신뢰성을 구체적으로 제시한다.

2. 비선형 유한요소법에 의한 이론적 해석

해석모델은 비선형 유한요소해석으로 하여 콘크리트는 8절점을 가진 4각형 요소로 하고 철근은 1차원 선형요소로 하고 있다.

강성매트릭스와 응력의 산정에 한 평면요소당 4점을 선정하는 가우스의 근사 적분법을 적용하였다³⁾. 콘크리트의 거동은 다른 구조재료에 비해 상당한 비

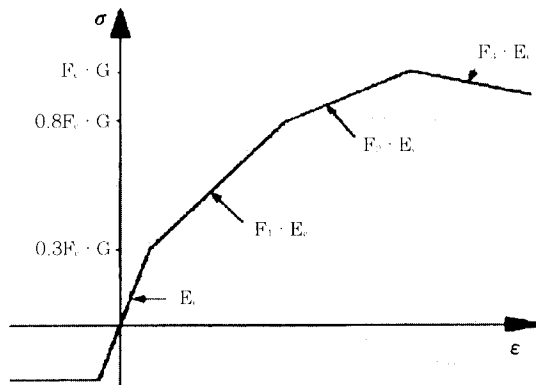


Fig. 1 Assumed Stress-strain curves for concrete

선형성을 나타낸다. 이러한 비선형성에 대한 규명은 콘크리트의 거동에 가장 큰 영향을 주는 매개변수의 적절한 선택이 매우 중요하다고 본다⁴⁾. 본 연구에서는 콘크리트의 응력도-변형도 관계에서 주응력비(σ_2 / σ_1)에 따른 강도증가계수(G)와 비선형저감계수(F)를 사용하여 비선형 근사해석에 반영하였다 (Fig. 1).

3. 콘크리트의 거동

3.1 응력-변형도 관계(1축)

Wang⁵⁾ 등에 의한 실험결과로부터 보통중량콘크리트와 경량콘크리트의 응력-변형도 곡선의 비교(Fig. 2)에서 보통중량콘크리트의 경우는 최고점의 변형과 변곡점에서의 변형이 압축강도의 증가와 함께 변하지 않는 반면 경량콘크리트의 경우는 압축강도의 증가와 함께 최고점에서의 변형이 선형적으로 증가하는 것을 관찰할 수 있다(Fig. 2(b)). 또 경량콘크리

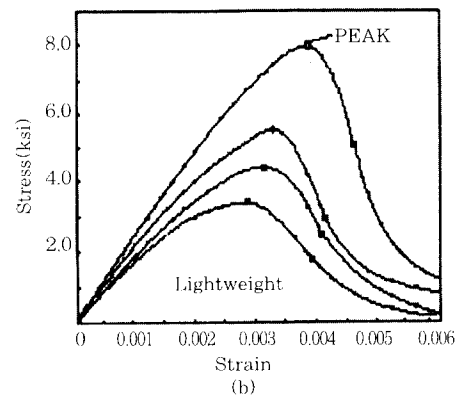
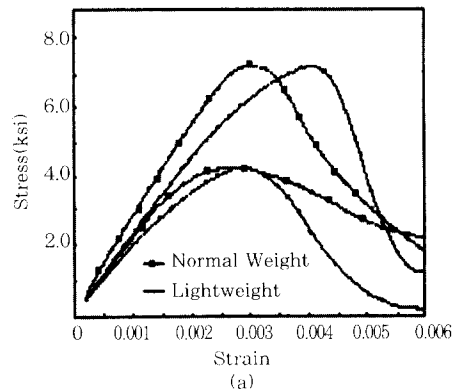


Fig. 2 Stress-strain curves for lightweight concrete

트의 경우 파괴이후 응력-변형도 곡선의 기울기가 보통중량콘크리트에 비해 매우 급하여 취성파괴의 성향을 띄며 이것은 상승부분의 완만한 상승구배의 응력-변형도 곡선과는 대조적이다. Fig. 2(a)는 경량콘크리트와 보통중량콘크리트의 비교이고 Fig. 2(b)는 압축강도에 대한 경량콘크리트의 응력-변형도 곡선을 나타낸다. 따라서 본 연구에서는 Wang⁶⁶등이 제안한 탄성계수와 피크점에서의 극한변형도에 대한 식을 사용하였다.

3.2 콘크리트의 비선형 근사해석

2축 상태의 콘크리트는 1축 상태에 비하여 강도의 변화가 발생하며, 이 강도의 변화는 콘크리트 재료의 구성성분에 의하기 보다 주응력비에 의해 변화한다는 것을 Fig. 3로부터 알 수 있다. Fig. 3은 콘크리트의 2축 실험분야에서 신뢰성을 인정받은바 있는 Kupfer⁶⁷등의 보통중량콘크리트에 대한 실험결과와 Atan⁶⁸등의 경량콘크리트에 대한 실험결과를 비교한 것이다. 또 다른 연구자들로부터 제안된 2축 압축하의 보통중량콘크리트에 대한 파괴응력곡선의 비교도 함께 나타나있다.

모든 곡선들이 주응력비 $R(\sigma_2 / \sigma_1) = 0.4 \sim 0.6$ 의 응력조합에서 25~30%의 최대강도증가를 나타낸다⁶⁹. 그러므로 2축에서 경량과 보통중량콘크리트의 파괴응력곡선의 형태는 일반적으로 유사하다고 할

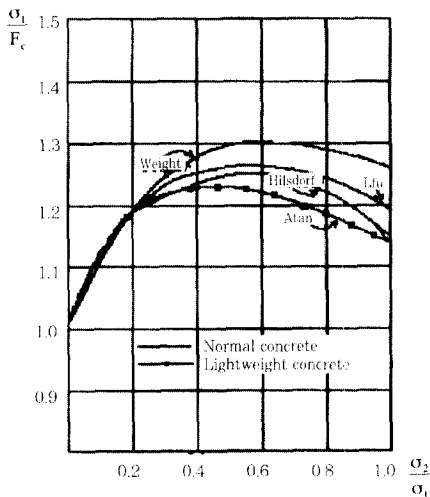


Fig. 3 Comparison of failure stress envelopes under biaxial compression obtained by various authors

수 있다. 또 여기서 보통중량콘크리트에 대해 제안된 다른 연구자들의 결과들에 비해 경량콘크리트에 대한 Atan⁶⁸등의 실험값과 Kupfer⁶⁷등의 실험값이 더 근접함을 알 수 있다. 이 결과는 2축 실험에 대한 자료가 많지 않은 경량콘크리트에 있어서 신뢰성 있는 보통중량콘크리트에 대한 2축 실험의 자료를 함께 사용할 수 있음을 나타낸다.

(1) 강도증가계수(G)

2축을 받는 콘크리트는 1축 강도에 비해 강도의 증감이 생긴다. 2축 압축은 Atan⁶⁸등의 경량콘크리트에 대한 실험값을 사용하였고, 인장-압축과 2축인장에 대해서는 Kupfer⁶⁷등의 실험값을 사용하여 주응력비에 따른 강도의 증감을 아래의 방정식으로 나타내었다. Fig. 4는 주응력비에 따른 2축 압축시의 강도증가계수를 나타낸 것이다.

1) 2축 압축(compression-compression)에 대해

$$G = 1 + (0.965 + (-1.65 + 1.2375 \times (-0.5 + R)) \times (-0.2 + R)) \times R \quad (1)$$

2) 인장-압축(tension-compression)에 대해
 $R < -0.067$ 일 때

$$G = \frac{TU}{R - (0.8 \times TU)} \quad (2a)$$

$R \geq -0.067$ 일 때

$$G = \frac{TU}{R - (1 + 0.6R - 35.62R^2) TU} \quad (2b)$$

여기서, TU = 콘크리트인장강도
 $R = \sigma_2 / \sigma_1$ (주응력비)

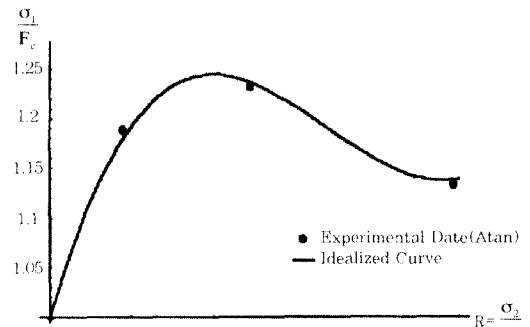


Fig. 4 Failure stress envelope for different stress ratio under compression-compression stress (lightweight concrete)

3) 2축 인장(tension-tension)에 대해

$$G=0.11+(-0.16+0.309 \times (-0.315+F_c)) \times (-0.19+F_c) \quad (3)$$

(2) 비선형저감계수(F)

비선형 저감계수는 초기탄성계수에 대해 주응력비에 따라 변하는 각 부분선형구간에서의 기울기를 나타내기 위한 변수이며 아래와 같은 방법으로 구한다 (Fig. 1).

- ① 전체 응력-변형곡선을 0~0.3F_c (탄성역), 0.3F_c~0.8F_c (비탄성역), 0.8F_c~F_c (파괴역), F_c~파괴이후(변형도연화역)의 4구간으로 나눈다.
- ② 주응력비에 따른 각 구간의 탄성계수(기울기)를 구한다.
- ③ 주응력비에 따라 각 구간에서 구한 탄성계수를 콘크리트의 초기접선탄성계수(0~0.3F_c)에 대한 비율로 표시한다.
- ④ ③항에서 구한 값으로 방정식을 만든다.

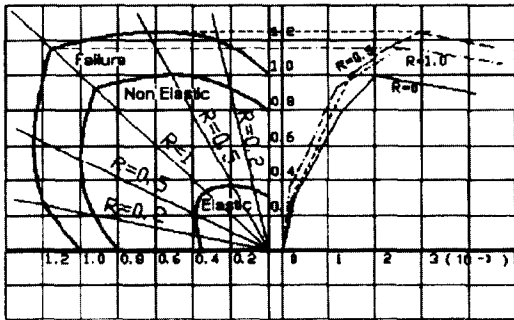


Fig. 5 Stress-strain curves for different stress ratio under compression-compression stress

비선형 저감계수는 보통중량콘크리트에 대한 Kupfer^{6,7)} 등의 실험값을 사용하여, 상기의 방법에 의한 비선형 저감계수에 대한 방정식들이 주응력비에 대한 함수로 아래에 나타나있다. 단 2축 인장은 파괴시까지 탄성변형을 하는 것으로 하였다. Fig. 5는 2축 압축시 주응력비에 따른 콘크리트의 강도증가와 각 부분의 선형구간에서 탄성계수변화를 나타낸 것이다.

1) 2축 압축(compression-compression)에 대해

$$\text{탄성역} : \sigma_{\min} \leq 0.3F_c \cdot G \quad (4)$$

$$F=1.0$$

$$\text{비탄성역} : 0.3F_c \cdot G < \sigma_{\min} \leq 0.8F_c \cdot G \quad (5)$$

$$F=0.47+(-0.0962+0.2837 \times (-0.52+R)) \times R$$

$$\text{파괴역} : 0.8F_c \cdot G < \sigma_{\min} \leq F_c \cdot G \quad (6)$$

$$F=0.246+(-2.1731+2.1668 \times (-0.052+R)) \times R$$

$$\text{변형도 연화역} : F_c \cdot G < \sigma_{\min} \quad (7)$$

$$F=-\frac{1}{2} \times (0.246+(-2.1731+2.1668 \times (-0.052+R)) \times R)$$

2) 인장-압축(tension-compression)에 대해

$$\text{탄성역} : \sigma_{\min} \leq 0.3F_c \cdot G \quad (8)$$

$$F=1.0$$

$$\text{비탄성역} : 0.3F_c \cdot G < \sigma_{\min} \leq 0.8F_c \cdot G \quad (9)$$

$$F=0.48+(1.7308+(-20.6109+167.963 \times (-0.103+R)) \times (-0.052+R)) \times R$$

$$\text{파괴역} : 0.8F_c \cdot G < \sigma_{\min} \leq F_c \cdot G \quad (10)$$

$$F=0.267+(-0.7692+(39.8307-288.06 \times (-0.103+R)) \times (-0.052+R)) \times R$$

$$\text{변형도 연화역} : F_c \cdot G < \sigma_{\min} \quad (11)$$

$$F=-\frac{1}{2} \times (0.267+(-0.7692+(39.8307-288.06 \times (-0.103+R)) \times (-0.052+R)) \times R)$$

3) 2축 인장(tension-tension)에 대해

$$\text{탄성역} : \sigma_{\min} \leq F_c \cdot G \quad (12)$$

$$F=1.0$$

$$\text{변형도 연화역} : F_c \cdot G < \sigma_{\min} \quad (13)$$

여기서, G: 강도증가계수
R: 주응력비

(3) 극한변형도(ε_{lu})

2축 응력을 받는 콘크리트의 극한변형도(ε_{lu})의 결정에서 2축 압축은 Atan⁸⁾ 등의 경량콘크리트에 대한 실험값을 사용하였고, 인장-압축과 2축 인장은 Kupfer^{6,7)} 등의 실험값을 사용하여 다음과 같이 나타내었다. 2축 인장에서는 주응력비에 따른 변화가 거의 없으므로 근사적으로 ε_{lu}=0.01×10² 값의 상수

로 가정하여 비선형 이론에 적용시켰다. Table 1은 주응력비에 따른 최대응력에서 극한변형도를 나타낸 것이다. 2축 압축과 인장-압축에 대한 식(14)와 식(15)의 그래프가 Fig. 6과 Fig. 7에 나타나있다.

1) 2축 압축(compression-compression)에 대해

$$\epsilon_{1u} = E_0 + (0.002 + (4.34 \times 10^{-18} - 5.375 \times 10^{-3} \times (-0.5 + R))(-0.2 + R)) \times R \quad (14)$$

Table 1 Decision of strain at maximum stress under different stress ratio

| | $R(\sigma_2 / \sigma_1)$ | $\epsilon_{1u} (\times 10^{-3})$ |
|-----------|--------------------------|----------------------------------|
| | Com.-Corr. | 0 |
| 0.2 | | 0.24 |
| 0.5 | | 0.3 |
| 1.0 | | 0.185 |
| Ten.-Com. | $R(\sigma_2 / \sigma_1)$ | $\epsilon_{1u} (\times 10^{-3})$ |
| | 0 | 0.22 |
| | 0.052 | 0.145 |
| | 0.103 | 0.079 |
| | 0.204 | 0.045 |
| Ten.-Ten. | constant | 0.01×10^{-2} |

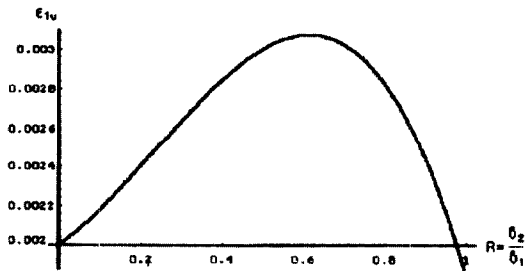


Fig. 6 Strain at maximum stress for different stress ratio under compression-compression (lightweight concrete)

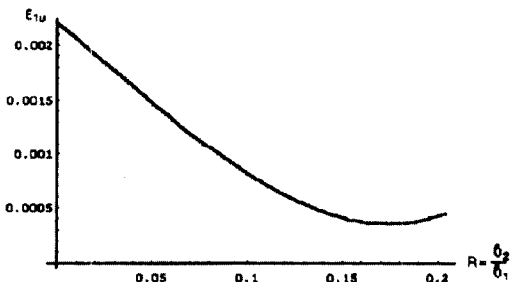


Fig. 7 Strain at maximum stress for different stress ratio under tension-compression (normal weight concrete)

여기서, E_0 : 1축 압축시의 극한변형도

2) 인장-압축(tension-compression)에 대해

$$\epsilon_{1u} = 0.0022 + (-0.0144 + (0.0144 + 0.2383 \times (-0.103 + R))(-0.052 + R)) \times R \quad (15)$$

3) 2축 인장(tension-tension)에 대해

$$\epsilon_{1u} = 0.01 \times 10^{-2} \quad (16)$$

이 연구에서 비선형의 적용은 (2)항에서 구한 비선형 저감계수(F)를 가우스 적분법에 의한 적분시 가중계수에 곱하여 요소의 강성매트릭스를 산정하도록 하였다. 따라서 가우스적분식은 아래와 같이 된다.

$$I = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 (W_i W_j F_{i,j}) G(\xi_i, \zeta_j) \quad (17)$$

여기서, $F_{i,j}$ 는 비선형 저감계수이고, W_i, W_j 는 가중계수로서 각기 1.0의 값을 가지며, $G(\xi_i, \zeta_j)$ 는 임의의 함수 $G(x, y)$ 를 요소전체에 걸쳐 적분하기 위해서 자연좌표계(natural coordinate)로 변환한 함수이다.

이 연구에서 철근은 완전 탄·소성체로서 축방향 응력이 항복응력에 도달하면, 접선탄성계수가 0(zero)이 된다고 가정하였다.

4. 유한요소 모델링

구조물의 분할(discretization)과정은 실제 구조물과 이에 작용하는 하중 등을 근사적으로 해석하기 위한 수치해석 모델로 구성하는 과정이다. 본 연구에서는 2차원 직사각형요소로 분할하였으며, 절점당 자유도의 수는 2개로 하였다.

Fig. 8은 모델링된 시험체를 보여준다.

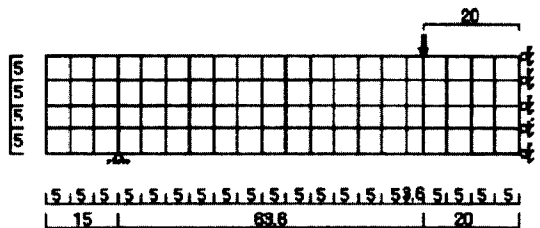
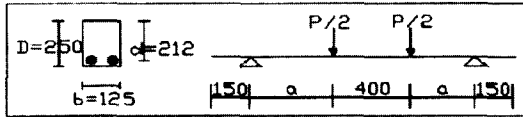


Fig. 8 Finite element model for HB3-NS3 specimen

5. 실험값과의 비교 · 분석

권우현¹⁾, 신종렬²⁾ 등에 의해 행해진 2회에 걸친 경량고강도콘크리트 보에 대한 실험결과가 이론해석값과 비교되었다. 시험체의 형태와 크기 및 단면성능은 Table 2와 같다.

Table 2 Detail of test beam



| Specimen | Content | Shear span ratio (a/d) | Size (cm) | | Steel ratio (ρ_s) | Tensile steel | Length (cm) |
|----------|---------|------------------------|-----------|----|--------------------------|---------------|-------------|
| | | | b | D | | | |
| HB2-WS | | 2.5 | 12.5 | 25 | 0.015 | 2-HD16 | 176.0 |
| HB3-WS | | 3.5 | 12.5 | 25 | 0.015 | 2-HD16 | 218.4 |
| HB1-NS | | 1.5 | 12.5 | 25 | 0.015 | 2-HD16 | 173.3 |
| HB6-1-NS | | 6.0 | 12.5 | 25 | 0.096 | 2-HD13 | 324.4 |
| HB4-2-NS | | 4.0 | 12.5 | 25 | 0.015 | 2-HD16 | 239.6 |
| HB6-2-NS | | 6.0 | 12.5 | 25 | 0.015 | 2-HD16 | 324.4 |
| HB4-3-NS | | 4.0 | 12.5 | 25 | 0.022 | 2-HD19 | 239.6 |

WS:with stirrup, NS:without stirrup

5.1 시험체의 개요

실험에 사용된 조골재는 팽창점도를 주원료로 고온에서 소성한 최대크기 19mm의 구조용 경량골재로서, 고강도를 내기 위해 고성능감수재와 실리카흄을 사용하였다. 공시체의 압축강도는 HB2-WS, HB3-WS, HB1-NS가 440kg/cm²이고, 그외의 시험체는 모두 압축강도가 577.76kg/cm²이다. 시험체의 파괴형태는 전단보강하지 않은 시험체는 사인장균열에 의한 전단파괴를 일으켰고 전단보강한 시험체는 휨균열 및 가력부압축에 의해 파괴되었다.^{1,2)}

5.2 시험체의 하중-변위곡선 비교

경량콘크리트에 대한 실험값과 이론해석한 값의 비교가 Table 3과 Fig. 9에 나타나 있다.

Table 3에서 비교된 값은 파괴하중이다.

Table 3 Comparison of load-displacement response

| specimen | Maximum Load | | |
|----------|--------------|------------|--------------|
| | Anal. (ton) | Exp. (ton) | Exp. / Anal. |
| HB2-WS | 12.0 | 13.5 | 1.12 |
| HB3-WS | 11.0 | 10.5 | 0.95 |
| HB1-NS | 18.0 | 20 | 1.1 |
| HB6-1-NS | 4.5 | 4.0 | 0.89 |
| HB4-2-NS | 7.5 | 8.4 | 1.1 |
| HB6-2-NS | 6.0 | 5.5 | 0.91 |
| HB4-3-NS | 10.5 | 10.0 | 0.95 |

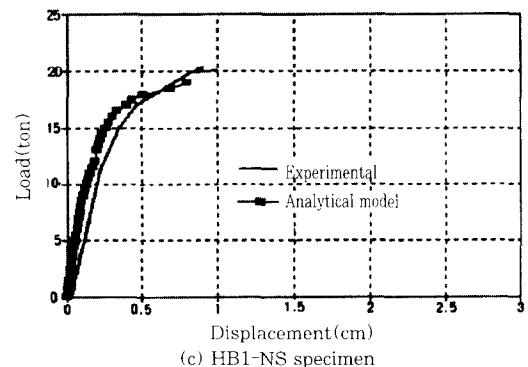
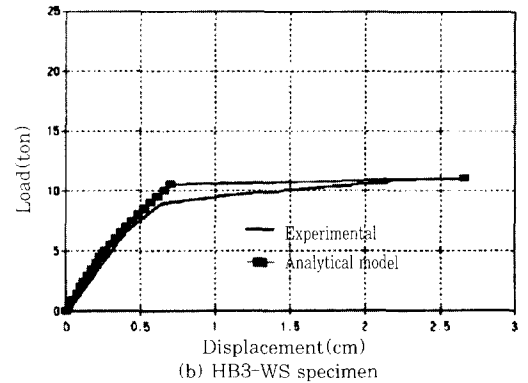
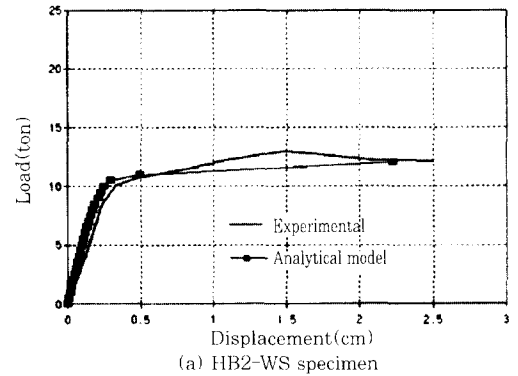
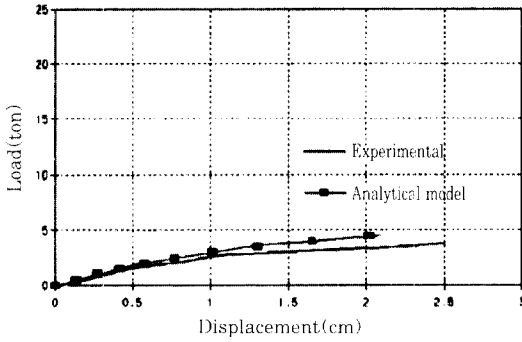
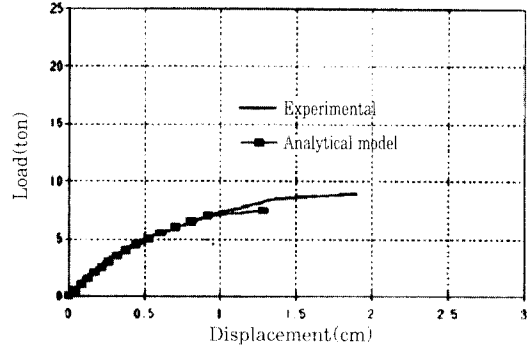


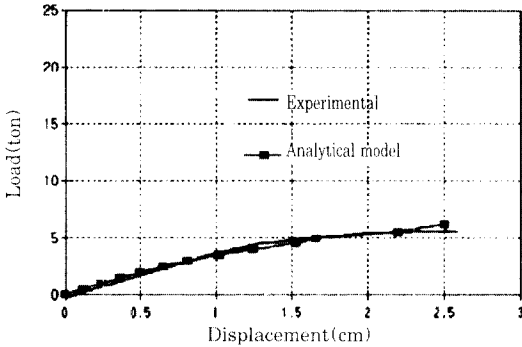
Fig. 9 Comparison of load-displacement curves for each specimen



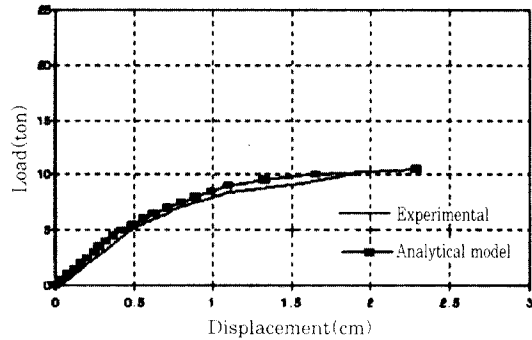
(d) HB6-1-NS specimen



(e) HB4-2-NS specimen



(f) HB6-2-NS specimen



(g) HB4-3-NS specimen

Fig. 9 Comparison of load-displacement curves for each specimen

6. 결론

본 연구에서는 경량콘크리트의 비선형 거동해석을 위한 이론모델을 만들어 실험값과 비교·분석하였다. 콘크리트의 비선형 이론모델은 Atan⁶⁶ 등의 경량콘크리트에 대한 시험결과와 Kupfer⁶⁷ 등이 제시한 보통중량콘크리트에 대한 시험결과를 비교·분석하여 이를 토대로 구성방정식에 반영하였으며, 구성방정식은 콘크리트의 2축 상태에서 주응력비에 따른 강도증가계수와 주응력비에 따른 응력도-변형도 곡선에서 각 구간의 기울기변화를 나타내는 비선형 저감계수로 표현되었다.

이론해석의 적용성을 확인하기 위해 권우현과 신종렬¹² 등에 의해 행해진 경량콘크리트에 대한 실험결과와 비교하였으며, 그 결과는 파괴하중에 대한 이론값과 실험값이 10%내외의 오차로 근접하였고 전체적인 이론값의 하중-변위 곡선이 실험치와 잘 일치함으로써 비선형 구성방정식의 타당성을 확인할 수 있었다.

따라서 본 연구에 의한 이론해석식은 경량콘크리트보의 거동을 예측하고 해석하는데 유용하게 사용되어 질 수 있을 것으로 사료된다. 그러나 앞으로 더 많은 자료에 근거하여 보다 정확한 모델을 만들어야 된다고 생각한다.

참고 문헌

1. 박윤근, 권우현, 오창륜, 노희일, "전단보강이 없는 고강도 경량콘크리트보의 전단 거동에 관한 실험적연구", 대한건축학회 논문집, 제 13권 제6호, 1997년 6월 pp255-266
2. 박윤근, 신종렬, 권우현, 권기혁, 노희일, "경량 고강도 콘크리트보의 전단거동에 관한 연구", 콘크리트학회논문집, 제8권, 제 4호, 1996년, 8월, pp255-266
3. 박윤근 "철근콘크리트 벽체의 비선형 유한요소 해석에 관한 연구", 대한건축학회 논문집, 제12권 제4호, 1996년, 4월, pp189-196
4. Taylor, M.A., Romstad, K.M., Herrmann, L. R., "Numerical Biaxial Characterization for Concrete," J. of Eng. Mech. Div., ASCE, Vol. 100, No. EM5,

- Oct., 1974, pp. 935-948.
5. P. T.Wang S. P. Shah, and A. E. Naaman. "Stress-Strain Curves of Normal and Lightweight Concrete in Compression." ACI Journal, Vol. 75. 62 November, 1978, pp603-611
 6. Kupfer, H.B., and Gerstle, K.H.. "Behavior of Concrete under Biaxial Stresses." Journal. of Eng. Mech., ASCE, Vol.99, No.4, Aug., 1973, pp.853-866.
 7. Kupfer, H.B., Hilsdorf, H.K., and Rüsçh, H., "Behavior of Concrete under Biaxial Stresses." ACI Journal, Vol. 66, No. 52, Aug., 1969, pp.656-666.
 8. YASAR.ATAN, and FLOYD, O.SLATE, "Structural Lightweight Concrete Under Biaxial Compression", ACI Journal, Vol. 70, No. 17 March, 1973 pp. 182-186.

요 약

본 연구에서는 경량콘크리트보의 거동을 연구하는데 적용될 수 있는 비선형해석이 나타나있다. 콘크리트에 대한 2축 실험 자료를 사용하여 경량콘크리트의 구성모델을 만들었다. 구성모델에서 콘크리트의 비선형성은 주응력비에 따른 강도증감계수와 탄성계수의 변화에 따른 비선형저감계수를 사용하여 나타내었다. 유한요소 모델해석에서 콘크리트는 8절점을 가진 사각형요소로하고 철근은 1차원 선형요소로 가정하여 해석하였다. 유한요소해석으로부터 얻어진 수치해석결과와 실험실에서 행한 실험결과를 비교하였다.

(접수일자 : 1998. 1. 6)