

합성형 거더의 3차원 비선형 거동해석

Nonlinear Finite Element Analysis of Steel Composite Girders

주영태* 강병수 성원진 박대열 이용학**

Joo, Young Tae Kang, Byung Soo Seong, Won Jin Park, Dae Yeol Lee, Yong Hak

ABSTRACT

Progressive failure analysis of steel composite double T-beam is performed to investigate the mechanical effects of steel composite fabricated in the webs of double-T beam to replace concrete placing forms. The analysis is based on nonlinear finite element scheme considering material nonlinearities of concrete, reinforcing bar and PS steel. Four-parameter strength envelope defines the hardening and softening phenomena of concrete with consideration of the various levels of confining pressures. Rankine maximum strength criterion defines the elasto-plasticity of PS steel and reinforcing bar, and Von Mises J_2 failure criterion for steel plate which wraps the concrete webs of double T-beam. A 6m long two-span steel composite double T-beam is analyzed and compared with the experimental results.

1. 서 론

여러 가지 형태의 강-콘크리트 합성 구조물들은 최근에 집중되고 있는 여러 주제들 중 하나로 자리를 잡고 있다. 이들 중 강합성 Double-T형 보는 T형 웹 부분의 콘크리트 타설 시 거푸집 대신 강재를 사용하여 타설하는 방식으로 강재와 콘크리트의 합성거동 및 PS 긴장력을 통해 휨에 저항하는 새로운 형식의 강-콘크리트 합성 구조물이다. 본 논문에서는 강합성 Double-T형 보의 거시적 비선형성과 파괴메카니즘 및 구조체로서의 극한거동능력을 파악하기 위해 탄-소성이론에 근거한 콘크리트, 강재 및 PS강연선의 재료비선형성과 구조체의 원천적 3차원성을 고려한 점진적 파괴해석을 수행하였다. 수치해석 예제로서 최근에 6m지간의 2경간 Double-T형 보로 제작한 공시체를 택하여 수치해석을 수행하였고 1차원 보요소를 사용하여 비선형 유한요소해석을 수행한 해석결과 및 실험결과와 비교하였다.

2. 재료 비선형 모델

2.1 Concrete 재료비선형 모델

2.1.1 파괴포락선

콘크리트 경화 및 연화현상을 규정하기 위한 파괴규준은 Willam과 Warnke (1974)의 타원형 편차 평면 함수에 근거하여 최근 개발된 네 계수 파괴포락선을 사용하였다(이용학 1999). 인장 및 낮은 구속응력 하의 취성거동으로부터 높은 구속응력 하의 연성거동까지 콘크리트 전 거동영역에서 블록조건과 C_1 -연속성을 만족시키는 두 개의 마찰계수, 한 개의 점착계수 및 한 개의 캡 계수로 구성된 네 계수 파괴포락선은 다음과 같다.

* 정희원, 건국대학교 토목공학과 박사과정 · 공학석사

** 정희원, 건국대학교 토목공학과 부교수 · 공학박사

$$F = \left[\left(\frac{r(\theta)}{f'_c g(\theta)} - A \right)^2 + k_a \left(k_b - \frac{\xi}{f'_c} \right) - B^2 \left(\frac{\xi}{f'_c} + k_n \right) \right]^2 + 4B^2 k_a \left(k_b - \frac{\xi}{f'_c} \right) \left(\frac{\xi}{f'_c} + k_n \right) = 0 \quad (1)$$

여기서, $A = k_c(\xi/f'_c + k_n) - \sqrt{(-k_a)(k_b + k_n)}$, $B = \sqrt{(-k_a) - k_c \sqrt{(k_b + k_n)}}$, $r(\theta) =$ 편차응력 크기, $g_c(\theta) =$ 편차평면 형상함수, $\theta =$ 편차평면 형상각, $\xi = 1$ 차 불변량, $f'_c =$ 일축압축강도, $k_a =$ 마찰계수, $k_b =$ 점착·탈점착계수, $k_c =$ 마찰계수, $k_n =$ 캡계수이다.

경화과정은 최대응력점 이전 영역에서 탄성한계를 초과하여 변형이 진행되는 비탄성적 변형과정으로서 재료의 소성변형 크기에 따라 경화가 진행된다는 변형경화 가정을 따르며, 이때 소성변형의 크기는 스칼라량화된 등가소성변형으로 정의하였다. 초기탄성 파괴포락선으로부터 극한 파괴포락선까지의 팽창과정을 의미하는 콘크리트의 점진적 경화과정을 제어하기 위한 무차원 강도계수는 등가소성변형에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$k = \frac{2}{\epsilon_0} (\sqrt{2\epsilon_0 \epsilon_p} - \epsilon_p), \quad 0 \leq k \leq 1 \quad (2)$$

여기서, $\epsilon_0 =$ 구속응력 크기에 따른 연성도(ductility measure)이다.

연화과정은 평균의 의미를 갖는 변형률보다는 구조물의 국부적 균열거동 현상을 정의하는 균열열립면의 개념을 도입하여 정의하였다. 결과적으로 콘크리트 재료의 균열로 형성된 국부적 불연속을 등가의 연속체로 고려하여 구조물 전체에 고루 분포된 형태로 치환하는 연속적 모델의 개념 하에 연화현상을 파괴에너지에 근거하여 수치모델화 하였다. 두 마찰계수의 감소를 통해 점진적 연화과정을 제어하기 위해 사용된 연화 강도감소계수는 다음과 같다.

$$k_a = (a^{\max} - a^{\min})(1 - R_{bc}(1 - c_T)) + a^{\min}$$

$$k_b = b^{\max}\{1 - R_{bc}(1 - c_T)\} \quad (3)$$

식 (3)에서 강도감소계수 R_{bc} 는 1) 취성-연성파괴를 구분하는 전이점(transition point)에서 파괴포락선의 C^1 -연속성을 유지하고, 2) $\xi/f'_c \leq (\xi/f'_c)_{ts}$ 의 영역에서 연화를 방지하고, 3) $(\xi/f'_c)_{ts} \leq \xi/f'_c$ 의 영역에서 연화를 유도한다 (여기서, $(\xi/f'_c)_{ts} =$ 전이점). 식 (3)의 $0 \leq c_T \leq 1$ 범위에 있는 연화강도계수 c_T 의 변화에 따라 파괴포락선은 $c_T = 1.0$ 의 극한 파괴포락선으로부터 $c_T = 0$ 의 잔류 파괴포락선까지 점진적으로 수축하는 연화현상을 제어한다.

또한, 탄성적으로 증가한 응력 증가분이 파괴포락선을 팽창시킬 때 소성흐름을 야기한다. 상관소성흐름으로 정의되는 소성변형 $\dot{\epsilon}_p$ 의 방향은 파괴포락선상의 수직벡터 $\mathbf{n} (= \partial F / \partial \boldsymbol{\sigma})$ 에 의해 결정되어지나 이는 낮은 압축응력 하에서 과도한 체적팽창을 유발하게 된다. 비상관소성흐름에 의한 소성변형 $\dot{\epsilon}_p$ 의 방향 결정은 $\mathbf{m} = \partial Q / \partial \boldsymbol{\sigma}$ 에 의해 결정되나 이 경우에 소성 포텐셜 Q 가 먼저 규정되어야 한다. 소성포텐셜 Q 의 결정은 일반적으로 실험으로부터 얻어지며 복잡한 과정을 거치므로 본 논문은 소성흐름법칙에 의한 소성변형의 방향을 편차축과 등압축성분으로 나누고 등압축성분에 등압에 대한 임의의 함수를 추가하여 소성변형의 방향 \mathbf{m} 을 규정한다.

2.1.5 탄소성 접선연산자

물체의 미소균열에 따르는 손실을 고려치 않을 경우 탄성거동은 선형등방성연산자 \mathbf{E} 에 의해 지배되며 이 때 응력의 미소 변화량은 $\dot{\boldsymbol{\sigma}} = \mathbf{E} : (\dot{\boldsymbol{\epsilon}} - \dot{\epsilon}_p)$ 이며 여기에 소성변형을 $\dot{\epsilon}_p = \lambda \mathbf{m}$ 로 하여 유도된 탄소성 접선 연산자를 이용하여 표현하면 $\dot{\boldsymbol{\sigma}} = \mathbf{E}_{ep} : \dot{\boldsymbol{\epsilon}}$ 이다. 여기서 \mathbf{E}_{ep} 는 다음과 같다.

$$\mathbf{E}_{ep} = \mathbf{E} - \frac{\mathbf{E} : \mathbf{m} \otimes \mathbf{n} : \mathbf{E}}{-H_p \|\mathbf{m}\| + \mathbf{n} : \mathbf{E} : \mathbf{m}} \quad (4)$$

2.2 강재의 재료비선형 모델

강재는 von Mises 파괴 기준 $F = J_2 - k^2 = 0$ 을 사용하여 재료비선형 모델링한다. 이 파괴기준에서 k 는 순수 전단 상태에서 재료의 소성상태를 정의하는 소성상태변수이며 일축인장시험에서의 항복응력을 고려할 때 $k = f_y / \sqrt{3}$ 이 된다. 상관소성 흐름과 완전소성으로 강재의 재료특성을 정의할 때 결과적인 탄-소성 접선연산자는 다음과 같다.

$$\mathbf{E}_{ep} = \mathbf{E} - \frac{\mathbf{E} : \mathbf{n} \otimes \mathbf{n} : \mathbf{E}}{\mathbf{n} : \mathbf{E} : \mathbf{n}} \quad (8)$$

2.3 철근과 PS강연선의 탄-소성 모델

철근과 강연선은 축력만을 받는 bar 요소로 모델링하였으며 Rankine 파괴기준에 근거하여 철근은 탄성-완전소성 단계로 PS강연선은 경화구간을 고려하여 탄성-경화-완전소성 단계로 탄-소성 모델링하였다. 콘크리트와의 계면파괴는 고려하지 않는 full bonding으로 가정한다.

3. 수치해석

3.1 유한요소 모델링

수치해석 예제로서 그림 1에 보여진 6m 지간의 2경간 강합성 Double-T형 보를 택하여 수행하였다. 그림의 강합성 Double-T형 보의 건조수축과 크리이프를 방지할 목적으로 상부 콘크리트 슬래브에 교축방향으로 10-D13 철근을 배근하였고 복부콘크리트는 4.5mm두께의 강재로 포장되었으며 4개의 강연선을 총 140 tonf의 긴장력으로 긴장하였다. 이 때 강연선은 SWPC 7B 12.7mm를 사용하였다.

Tendon 요소는 긴장력을 도입하는 과정과 도입이후 하중이 작용하는 단계로 구분하여 긴장력을 도입하는 과정에서는 PS강연선의 강성을 무시하고, 하중이 작용하는 단계에서는 PS 강연선의 강성을 고려함으로써 하중에 의한 강연선의 저항성을 고려하도록 하였다.

콘크리트는 절점당 3개의 자유도를 갖는 8절점 3차원 brick 요소로, 강재는 절점 당 5개의 자유도를 갖는 4절점 Mindlin shell 요소로, 철근 및 PS 강연선은 절점 당 1개의 자유도를 갖는 2절점 bar 요소를 사용하여 3차원 유한요소 모델링하였다. 강재요소와 타 요소들 간 절점에서의 자유도 불일치는 콘크리트와 철근 및 Tendon 요소의 절점 자유도에 dummy 자유도를 추가하여 강성행렬을 형성한 후 이를 다시 제거하는 방법을 사용하였다. 또한 콘크리트와 강판의 계면은 full bonding 상태로 절점을 공유하는 것으로 모델링하였다.

또한, 하중의 재하는 변위제어 기법을 이용하여 제어하였으며 구조물 평형방정식의 해를 위해 Newton-Raphson 반복계산법을 사용하였다.

3.2 재료 물성 및 시험체

표 1 수치해석에 사용된 물성

| | 단면적 (cm^2) | 두께 (cm) | 탄성계수 (kgf/cm^2) | 포와슨 비 (ν) | 압축강도(항복강도) (kgf/cm^2) | 인장강도(항복강도) (kgf/cm^2) |
|------|-------------------|----------------|------------------------|--------------------|------------------------------|------------------------------|
| 콘크리트 | - | - | 209,779 | 0.19376 | 288.550 | 28.855 |
| 강재 | - | 0.45 | 2,033,500 | 0.3 | 2,900 | 2,900 |
| 철근 | 1.27 | - | 1,826,700 | - | 3,600 | 3,600 |
| 강연선 | 5.92 | - | 2,000,000 | - | 19,000 (인장강도) | 19,000 (인장강도) |

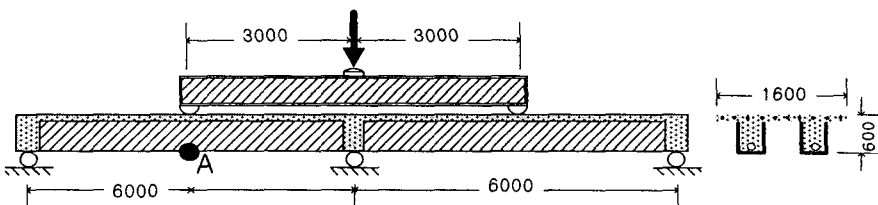


그림 1 시험체의 개략적인 형상 (단위 : mm)

3.3 해석 결과

그림 2는 하중에 의한 변형형상을 보여주며 그림 3은 그림 1의 시험체 에서 A점에서의 하중-처짐 관계를 3차원 거동해석결과 및 1차원 보 요소 해석결과와 비교한 것이다. 1차원 보 해석은 콘크리트와 강재 및 철근과 PS 강연선으로 구성되는 임의의 강 합성 거더 단면에 발생하는 응력-변형을 관계를 이용하여 정형화된 증분적 유한요소평형관계식을 통해 유도하였다. 여기서 휨 균열의 성장에 따른 중립축의 변화와 단면 2차 모멘트의 변화는 해석에서 계산된 변형을 본포관계를 사용하여 계산하였다. 실험에 보여진 바와 같이 3차원 유한요소해석과 1차원 유한요소해석의 결과는 비교적 잘 일치하나 실험결과는 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 이는 초기강성에서 발생한 차이 때문으로 판단되나 현재 실험이 진행 중에 있는 관계로 실험이 종료된 이후에 세밀한 분석을 필요로 한다.

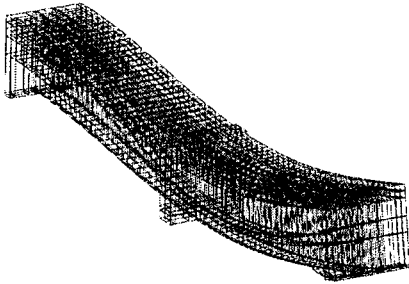


그림 2 하중에 의한 변형 형상

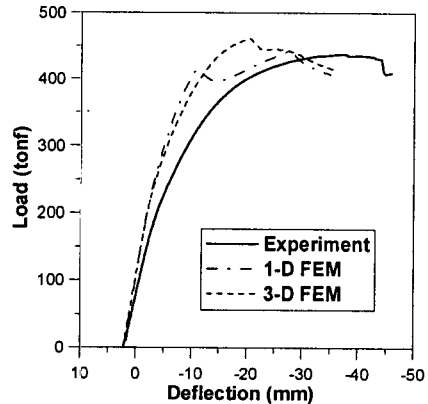


그림 3 하중-처짐 곡선

4. 결 론

강합성 Double-T형 보의 파괴메카니즘과 구조체로서의 극한거동능력을 파악하기 위해 탄-소성 이론에 근거하여 콘크리트 및 강재와 PS강연선의 재료비선형성과 구조체의 원천적 3차원성을 고려한 점진적 파괴해석을 수행하였다. 수치해석 시 PS 강연선의 거동적 특성을 고려하여 긴장력이 도입되는 단계에서 강연선의 강성은 무시하였고 긴장력이 도입된 이후에 강연선의 강성을 고려함으로써 실제의 강연선이 갖는 역학적 저항메카니즘을 구현하였다. 수치해석 예제로서 최근에 6m지간의 2경간 Double-T형 보로 제작한 공시체를 택하였으며 1차원 보요소로서 비선형 유한요소해석을 통해 계산한 해석결과와 현재 진행 중에 있는 실험결과와 비교하였다.

5. 참고문헌

- 이용학, " 콘크리트 3차원 구성모델을 위한 네 계수 파괴포락선의 개발", 대한토목학회논문집, Vol. 19, No.I-1, pp.79-88.
- Etse, G. and Willam, K. (1994). "A fracture energy-based constitutive theory for inelastic behavior of plain concrete", J. of Engreg. Mech., ASCE, Vol. 120, No. 9, pp.1983-2011.
- Hulburt, B. J. (1985). "Experimental and computational investigation of strain-softening in concrete." M.S. Thesis, CEAE Dept., University of Colorado, Boulder.
- Launay, P. and Gachon, H. (1972). "Strain and ultimate strength of concrete under triaxial stress." ACI Special Publ. SP-34.
- Lee, Y-H. and Willam, K. (1997b). "Mechanical properties of concrete in uniaxial compression." ACI Materials J., Vol. 94, No. 6, pp.457-471.
- William, K. and Warnke, P. (1974). "Constitutive model of triaxial behavior of concrete." Seminar on Concrete Structures Subjected to Triaxial Stresses, ISMES, Bergamo, Italy, IABSE-Report No. III, pp.1-30.