비선형 응력-변형률 특성을 갖는 콘크리트 충전 원형강관 보의 모멘트-곡률 관계

Moment-Curvature Relation of Concrete Filled Circular Steel Tubular Beam with Nonlinear Stress-Strain Properties

박 우 진*

Park, Woo-Jin

Abstract

This paper presents moment-curvature analytical method of concrete filled steel tubular members considering intensity increase phenomenon by triaxial compression stress generation. For this purpose, this study considers buckling characteristics about compression department of steel members that filled up light weight and normal concrete. The analytical results are compared with the test results. Even if beam that filled up light weight concrete was calculated moment-curvature relationship easily analytically and could know that analytical results estimates as well agreed with the test results in case filled up normal concrete. In addition, the efficiency and applicabilities of the proposed moment curvature relationship algorithm are verified through conventional experimental results.

요 지

본 연구에서는 순수 휨을 받는 중공 원형강관, 내부에 경량기포콘크리트 및 보통콘크리트를 충전한 원형강관 부재에 대하여 강재의 압축부에 대한 좌굴특성을 고려하고, 충전된 콘크리트의 삼축압축응력 발생에 따른 강도증가 현상을 고려하여 모멘트-곡률 관계를 계산하였다. 경량기포콘크리트를 충전하더라도 해석적으로 간편하게 모멘트-곡률 관계를 계산할 수 있다는 것을 확인하였으며, 보통콘크리트를 충전한 경우에는 해석값이 실험값에 근접한 결과를 추정함을 알 수 있었다. 또한 기존의 실험결과를 이용하여 본 연구에서 개발된 모멘트-곡률 관계 해석방법의 유효성을 검증하였다.

Keywords : Concrete Filled Tubular, Confined Concrete, Lightweight Foamed Concrete

핵심 용어 : 콘크리트 충전강관, 구속된 콘크리트, 경량기포콘크리트

1)

* 정회원, 서일대학 토목과 교수

E-mail : wjpark@seoil.ac.kr 02-490-7577

?본 논문에 대한 토의를 2005년 9월 30일까지 학회로 보내주시면 2006년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

강합성형교는 콘크리트계의 교량과 비교해서 유지관리면에서 강재의 보수․도장작업 등 유지관리비가 증가한다는 단점이 있다는 것이 일반적인 평가이다. 그러나 최근 기술발전과 전체 비용평가 측면에서 강합성형교가 재평가되고 있다. 예를 들면 강합성형교의 초기 투자비용인 제작 작업의 간소화로 인한 경제적 이득, 그리고 장기방청도료와 내후성강의 개발에 의해 보수도장으로 대표되는 유지관리의 최소화가 이루어져 경제적인 측면에서 재평가가 이루어지고 있다. 또한 강과 콘크리트의 합성에 의한 극한내력의 향상과 경량화, 시공성 향상 등 여러가지 장점으로 인해 강재를 주재료로 한 합성구조의 사용이 증가하고 있다.

지금까지 강관 내부에 콘크리트계 재료를 충전한 콘크리트 충전강관(CFT, Concrete Filled Steel Tube) 부재는 대부분 건축물의 기둥이나 합성 강교각의 형태로 사용되어 왔지만, 최근들어 CFT를 휨부재로 사용하고자 하는 연구가 국내외적으로 활발하게 이루어지고 있다. 이것은 CFT 부재가 갖는 우수한 내력 증가, 소음 및 진동억제 효과, 거더의 형고비 감소 등의 장점을 활용할 수 있으며, 거푸집 작업의 생략과 CFT 부재로서 원형강관을 사용함으로서 강재 I형 단면에 비해서 비틂강성과 횡강성 등의 성능이 우수하고, 국부좌굴이 방지됨으로서 내부 보강재나 다이아프램 등의 생략이 가능하기 때문이다.

이런 이유로 CFT 부재를 휨부재로 적용하고자 하는 연구가 2000년대에 들어서면서 활발하게 진행되고 있다. Elchalakani 등(2001)은 강관의 직경이 작은 (33㎜~110.9㎜) CFT 부재에 대하여 휨 실험을 실시하여 휨강도 및 연성내력을 평가하고, 재료가 완성 소성상태에 도달한 경우에 대한 모멘트 평가식을 제안하였으며, Chryssanthopoulos 등(2001)은 비선형 응력-변형률 관계를 이용하여 충전재를 갖지 않는 강관의 모멘트-곡률 관계와 하중-처짐 관계를 고찰하였다. Susantha 등(2001)은 강관의 구속효과에 따른 내부 충전콘크리트의 응력-변형률 관계를 제안하여 충전콘크리트의 압축강도의 증가경향을 고려한 해석을 수행할 수 있는 기초를 제시하였다. Nakamura 등(2002)은 내부 속채움 재료를 변화시켜가며 역학적 거동과 소음진동의 영향을 고찰하였으며, CFT 거더를 철도교로 적용하여 건설한 예를 보여주고 있다. 정철헌 등(2004)은 중공강관 및 콘크리트 충전강관의 휨 실험에 기초하여 하중 증가에 따른 중립축을 고찰하고, 유한요소해석을 수행하였다. 그러나 지금까지 대부분의 연구는 극한상태의 휨거동만을 고찰하거나 내부 충전콘크리트의 압축강도의 증가 경향만을 반영하였을 뿐, CFT 휨부재를 평가한 연구는 거의 수행된 예가 없다.

따라서, 본 연구에서는 내부 충전콘크리트의 압축강도의 증가경향과 강재의 변형률 경화 및 변형률 연화상태를 고려하여 CFT 휨부재의 모멘트-곡률 관계를 고찰하고자 한다.

2. 재료의 응력-변형률 특성

2.1 구속된 콘크리트의 응력-변형률 특성

콘크리트가 강재로 둘러싸여 구속을 받을 때, 콘크리트의 응력-변형률 관계는 Fig. 1과 같이 정의할 수 있다.

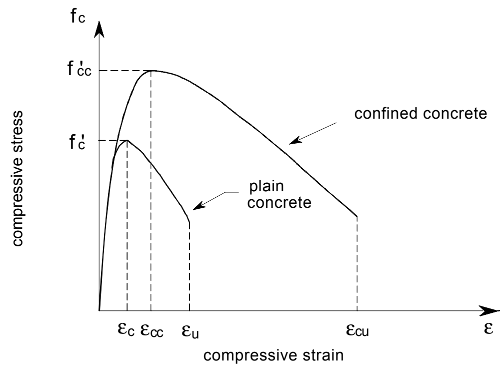


Fig. 1 콘크리트의 응력-변형률 관계

여기서, ε_{u} : 비구속된 콘크리트의 파괴시 변형률, ε_{cu} : 구속된 콘크리트의 파괴시 변형률이다.

콘크리트의 응력-변형률 곡선에 대한 수식은 Popovics에 의하여 제안되고, Mander(1988)에 의하여 수정된 식(1)~식(4)와 같이 계산된다.

$$f_c = f'_{cc}\frac{\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{cc}}\right) r}{r - 1 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{cc}}\right)^r} \qquad (1)$$

$$f'_{cc} = f'_c + m\, f_{rp} \qquad (2)$$

$$r = \frac{E_c}{(E_c - f'_{cc}/\varepsilon_{cc})} \qquad (3)$$

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_c\left[1 + 5\left(\frac{f'_{cc}}{f'_c} - 1\right)\right] \qquad (4)$$

여기서, f_c : 콘크리트의 일축압축응력, f'_c : 비구속된 콘크리트의 압축강도, f'_{cc} : 구속된 콘크리트의 압축강도, m : 경험적인 계수로 일반적인 콘크리트에 대하여 4~6의 값, f_{rp} : 콘크리트의 최대 반지름 방향 압력, ε_c : 비구속된 콘크리트의 압축강도에서의 변형률, ε_{cc} : 구속된 콘크리트의 압축강도에서의 변형률, ε : 콘크리트의 일축압축변형률 E_c : 콘크리트의 탄성계수이다.

식(1)에 표현된 원형강관에 충전된 콘크리트의 압축거동은 구속응력의 크기에 따라 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있다. Fig. 2는 압축강도가 27MPa, 탄성계수가 24,250MPa, 최대압축강도에서의 변형률 2000 με, 구속계수가 4.0인 경우에 대하여 강재의 구속응력 f_{sr}을 0, 1, 5, 10MPa로 변화시켰을 경우의 구속된 콘크리트의 응력-변형률 관계를 나타내고 있다.

콘크리트의 일축인장강도는 압축강도의 10%의 범위를 갖으며, 균열이 발생된 후의 콘크리트 거동은 Fig. 3과 같은 선형 인장강화효과에 의해 식(5)~(7)과 같이 변형률 ε의 크기에 따라 균열 후의 인장응력이 계산된다.

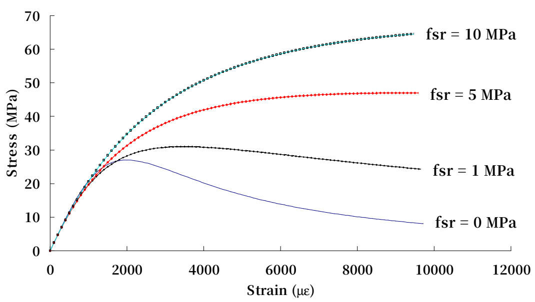


Fig. 2 구속압에 따른 콘크리트의 응력-변형률 관계

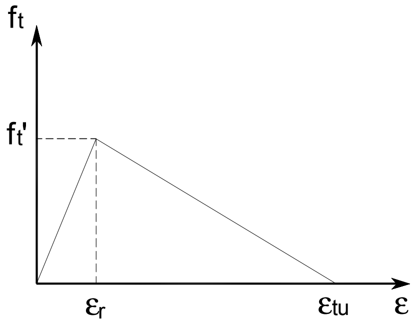


Fig. 3 콘크리트의 인장강화 모델

$$f_t = f'_t\,\varepsilon/\varepsilon_r,\quad 0 \le \varepsilon \le \varepsilon_r \qquad (5)$$

$$f_t = f'_t(1 - \varepsilon/\varepsilon_{tu}),\quad \varepsilon_r \le \varepsilon \le \varepsilon_{tu} \qquad (6)$$

$$f_t = 0,\quad \varepsilon > \varepsilon_{tu} \qquad (7)$$

여기서, f_t : 콘크리트의 인장응력, f'_t : 콘크리트의 인장강도, ε_r : 콘크리트의 인장강도에서의 변형률, ε_{tu} : 콘크리트의 인장파괴시 변형률이다.

2.2 강재의 응력-변형률 특성

강재의 응력-변형률 관계를 보다 실제값에 가깝게 고려하기 위해서 재료실험에서 얻어진 곡선을 변형률 경화(strain hardening)와 변형률 연화(strain softening) 현상을 고려한 다중선형 응력-변형률 곡선으로 Fig. 4와 같이 고려하였다.

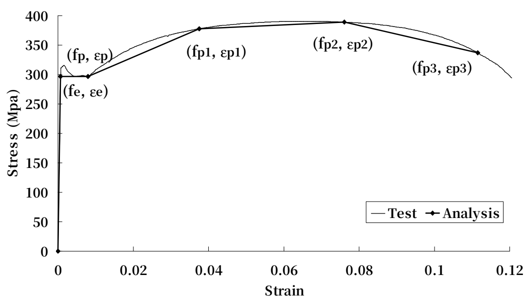


Fig. 4 강재의 다중선형응력-변형률 관계

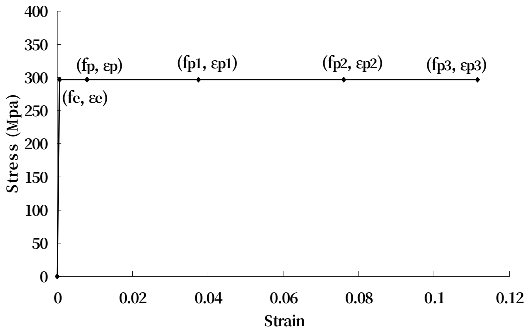


Fig. 5 강재의 국부좌굴을 고려한 응력-변형률 관계

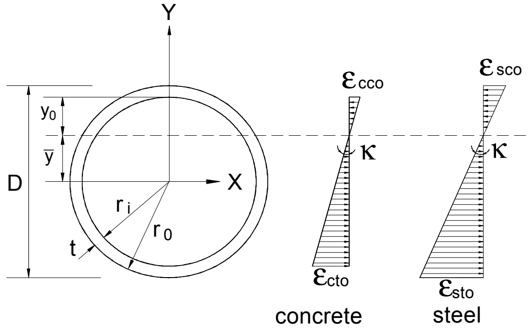


Fig. 6 중립축과 변형률 분포

속채움이 없는 중공강관에 휨이 발생하는 경우 압축 응력이 발생하는 부분은 국부좌굴이 발생하게 된다. 따라서, 압축을 받는 강관의 응력-변형률 관계는 국부좌굴의 영향을 고려하여 변형률 경화현상을 갖지 않는 탄성-소성상태로 가정하여 Fig. 5와 같이 나타내었다. 콘크리트 충전강관에서 압축이 작용하는 강관의 응력-변형률 관계는 Fig. 4와 Fig. 5를 모두 고려하여 이에 따른 모멘트-곡률 관계를 고찰하였다.

Fig. 4와 Fig. 5에서 ε_e와 ε_p는 각각 탄성한계상태와 소성한계상태의 변형률이며, f_e 와 f_p 는 동일한 값으로 강재의 항복응력을 나타내고, ε_{p1}, ε_{p2}, ε_{p3}와 f_{p1}, f_{p2}, f_{p3}은 각각 변형률 경화와 변형률 연화에서의 변형률과 응력을 나타내고 있다.

3. 콘크리트 충전 원형강관 보의 해석

3.1 콘크리트 충전 원형강관 보의 중립축 결정

재료 비선형 문제에 있어서 임의의 단면에 변형이 발생하면 단면을 구성하는 재료의 특성 및 위치에 따른 응력-변형률 관계가 다르게 나타난다. 따라서, 재료의 특성 및 위치에 대한 비선형성을 고려함으로써 구조재료의 비선형 해석을 수행할 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 2장에서 언급된 강재와 충전콘크리트의 비선형 응력-변형률 특성을 사용하여 CFT 보의 휨모멘트-곡률 특성을 해석적으로 계산하고자 한다.

해석시에는 다음과 같은 가정을 이용하여 CFT 보를 해석하였다. 부재의 파괴시까지 단면의 변형률은 직선분포를 한다고 가정하였으며, 충전콘크리트의 응력-변형률 관계는 Mander에 의하여 제안된 구속된 콘크리트의 응력-변형률 관계를 사용하였고, 휨모멘트 하중이 작용할 때 강관의 단면은 원형을 보존한다고 가정하였다.

CFT 보의 모멘트-곡률 관계를 해석하기 위하여 본 연구에서는 Fig. 6과 같이 강관과 내부 충전 콘크리트의 변형률이 직선분포를 한다고 가정하여 해석을 수행하였다. Fig. 6에서 충전 콘크리트의 압축연단에서의 변형률을 ε_{cco}, 인장연단에서의 변형률을 ε_{cto}, 강관의 압축연단에서의 변형률을 ε_{sco}, 인장연단에서의 변형률을 ε_{sto}로 나타내었다. 그리고 충전 콘크리트의 압축연단에서 중립축까지의 거리를 y_o, CFT 보의 도심에서 중립축까지의 거리는 $\bar{y}$, 강관의 외부직경을 D, 내부반지름을 r_i, 외부반지름을 r_o, 두께를 t, 곡률을 κ로 나타내었다.

모멘트-곡률 관계를 계산하기 위해서는 하중 작용에 따른 중립축의 위치를 구하여야 한다. 따라서, Fig. 7에 나타낸 바와 같이 단면을 많은 층으로 분할하여 각 층에 작용하는 힘을 구하여 더함으로써 각 재료의 압축과 인장에 대해 작용하는 힘을 구할 수 있고, 평형상태를 확인하여 중립축의 위치를 결정하게 된다. 그림에서 점선으로 표시된 선이 보의 중립축을 나타내며, X축은 보의 도심을 나타내고 있다.

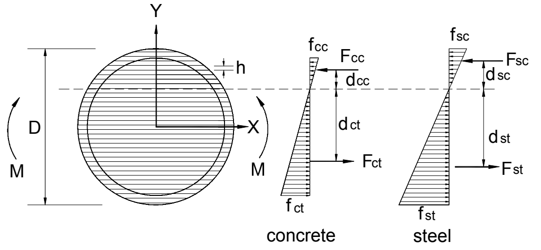


Fig. 7 선형탄성상태인 경우의 응력 분포

Fig. 7은 충전콘크리트와 강관이 모두 선형탄성상태인 경우에 대해서만 나타낸 것으로 변형률의 증가에 따라 발생응력의 형태는 변화할 것이며, F_{cc}는 충전콘크리트에 작용하는 압축력, F_{ct}는 인장력이며, F_{sc}는 강관에 작용하는 압축력, F_{st}는 인장력을 나타낸다. d_{cc}는 중립축에서 충전콘크리트의 압축력 작용위치까지의 거리, d_{ct}는 인장력 작용위치까지의 거리이며, d_{sc}는 강관의 압축력 작용위치까지의 거리, d_{st}는 인장력 작용위치까지의 거리를 나타낸다. 계산된 작용력을 식(8)과 같이 평형방정식을 구성하여 압축력의 총합과 인장력의 총합의 오차가 허용값 이내에 드는 경우에 중립축의 위치가 결정된다.

$$F_{cc} + F_{sc} = F_{ct} + F_{st} \tag{8}$$

3.2 콘크리트 충전 원형강관 보의 모멘트-곡률 계산

해석은 내부 충전콘크리트 상단부의 변형률과 곡률을 가정하고 이를 바탕으로 각 층의 변형률과 각 재료요소에 작용하는 힘을 구하여 평형상태를 확인한 후, 중립축의 위치를 계산하며, 중립축에 대한 모멘트-곡률을 계산한다. 모멘트-곡률 해석은 아래와 같은 방법에 따라 수행한다.

1) 전체 단면을 많은 층으로 분할한다. 각 층의 재료 특성은 단면으로부터 계산된다.
2) 곡률 κ의 초기값을 가정한다.
3) 충전 콘크리트 상단부의 압축변형률 ε_{cco}의 값을 가정한다.
4) 충전콘크리트 압축연단에서의 중립축 깊이 $\lambda_0 = \varepsilon_{cco} / \kappa$를 계산한다.
5) 변형률을 직선분포로 가정하여 중립축 거리에 따른 변형률을 계산한다.
6) 각 재료의 비선형 응력-변형률 관계에 근거하여 각층의 응력을 계산한다.
7) 단면에 대한 응력들을 모두 더한다.
8) 힘의 평형상태를 확인한다.
9) 평형상태가 가정된 압축변형률의 변화 상태를 만족하지 않으면, 평형상태가 만족될 때까지 2 ~ 8 단계를 반복한다.
10) 계산된 중립축 위치로부터 모멘트를 계산한다. (이값은 모멘트-곡률 곡선의 한 점이 된다.)
11) 곡률을 증가시키고 2 ~ 10 단계를 반복한다.

강관의 응력-변형률 관계는 인장부는 Fig. 4에 보인 바와 같이 탄성단계, 소성단계, 변형률 경화 2단계, 변형률 연화단계의 총 5개의 직선을 사용한 다중선형으로 근사화하여 고려하였다. 그리고 압축부는 인장부와 동일한 형태를 갖는 경우와 Fig. 5에 보인 바와 같이 좌굴의 영향을 고려한 탄성-소성상태 응력-변형률 관계의 2가지의 형태를 모두 사용하여 이에 따른 모멘트-곡률 관계를 계산하였다.

중립축의 위치가 결정되면 각 층에 발생하는 힘에 각 층까지의 거리를 곱하여 단면에 대하여 더함으로서 식(9)와 같이 단면에 발생하는 모멘트를 계산할 수 있다.

$$M = M_{cc} + M_{sc} + M_{ct} + M_{st} \tag{9}$$

여기서, M_{cc}: 콘크리트의 압축력에 의한 모멘트, M_{sc}: 강재의 압축력에 의한 모멘트, M_{ct}: 콘크리트의 인장력에 의한 모멘트, M_{st}:강재의 인장력에 의한 모멘트이다. 위와 같이 해석을 수행하여 모멘트-곡률 관계 곡선을 추정할 수 있다.

4. 해석결과

본 연구에서는 기존에 수행된 실험결과를 이용하여 제안된 해석방법의 유효성을 검증하였다.

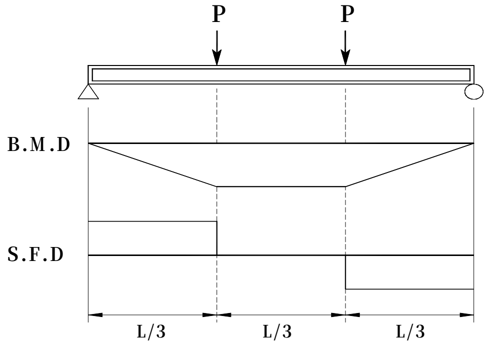


Fig. 8 4점 휨 실험 개요

이 실험은 KICT에서 시행된 것으로 실험에 사용된 강관의 제원은 SS400 강종의 기성제품으로 지름 508 ㎜, 두께 9㎜의 원형강관을 이용하여 콘크리트를 충전하지 않은 중공강관과 압축강도 27MPa의 보통콘크리트를 충전한 강관, 압축강도 8MPa의 경량기포콘크리트를 충전한 강관에 대하여 수행되었다. 콘크리트를 충전한 실험체에 대해서는 단부 격벽을 따로 설치하지 않았다.

실험은 경간길이 6m에 콘크리트 충진강관의 순수 휨 거동을 살펴보기 위하여 4점 휨 실험을 사용하였는데, 4점 휨 실험은 Fig. 8과 같이 계측구간에는 모멘트 값이 일정하고 전단력이 발생하지 않게 하는 실험이다. 실험 결과에 의하면 중공강관에 비하여 원형강관 내부에 경량기포콘크리트를 충전한 강관은 극한내력이 23% 증가하며 압축부에 좌굴이 발생한 반면, 보통콘크리트를 충전한 강관은 극한내력이 51% 증가하여 좌굴이 발생하지 않는 것으로 나타났다.

중공강관, 경량기포콘크리트 충전강관, 보통콘크리트 충전강관의 휨거동에 대한 비교를 위하여 실험결과를 토대로 모멘트-곡률 관계를 Fig. 9에 나타내었다. 휨곡률은 측정된 휨변형률로부터 식(10)에 의해서 계산되었다.

$$\kappa = \frac{\varepsilon_{sco} + \varepsilon_{sto}}{D} \qquad (10)$$

식(10)에서 ε_{sco}는 강관 상단 표면부, ε_{sto}는 강관 하단 표면부에서 측정된 변형률이고, D는 강관의 외경이다.

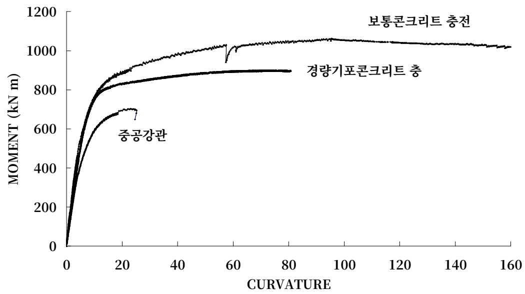
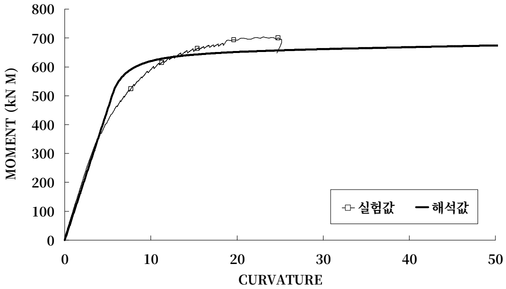


Fig. 9 중공강관 및 충전강관의 모멘트-곡률 관계

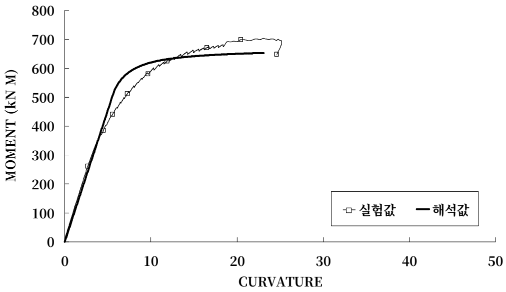
Fig. 9에 의하면 CFT 보 실험체는 매우 연성적인 거동을 보임을 알 수 있으며, 국부좌굴이 발생하지 않음에 따라 휨모멘트가 증가하면서 초기에는 탄성적인 거동을 보이다가 부재 응력이 항복응력에 도달하면서 비선형적인 거동을 보이고 있다.

Fig. 10은 중공강관에 대한 모멘트-곡률 관계를 나타내고 있다. Fig. 10의 (a)는 강관의 압축부의 좌굴을 고려하지 않은 경우이며, Fig. 10의 (b)는 좌굴을 고려한 경우이다. 그림에서 보면 항복시점의 실험값과 해석값이 차이를 나타내고 있는데, 이는 강재의 용접과 제작오차 등에 따른 잔류응력의 영향을 해석시에 고려하지 않았기 때문으로 판단된다. 물론 이에 따른 영향도 고려되어야 할 것으로 판단되나, 본 연구에서는 충전재료의 변화와 압축부의 좌굴 특성의 고려여부가 모멘트-곡률 관계에 미치는 영향을 고찰하기 위함이므로 강재의 용접과 제작오차 등에 따른 영향은 자세하게 고려하지 않았다. 그림에서 보여지듯이 (a)에서는 강관의 항복 후에도 계속적인 모멘트의 증가 경향을 나타내지만, (b)에서는 갑작스러운 모멘트의 감소가 발생하여 해석이 중단되는 현상을 볼 수 있다. 따라서, 중공강관의 해석시에는 좌굴특성을 반영하여 압축부를 탄성-소성상태로 모델링함으로서 강관의 갑작스러운 파괴형상을 시뮬레이션 할 수 있다는 것을 알 수 있다.

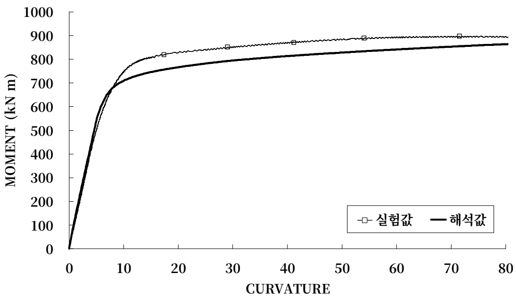
Fig. 11은 일축압축강도 8MPa를 갖는 경량기포콘크리트를 충전한 경량기포콘크리트 충전 원형강관의 모멘트-곡률 관계를 나타내고 있다. 해석값이 실험값보다 약간 낮게 모멘트를 추정하고 있으나, 충전재로서 경량기포 콘크리트를 충전하더라도 해석적으로 모멘트-곡률 관계를 추정할 수 있다는 것을 확인하였다.



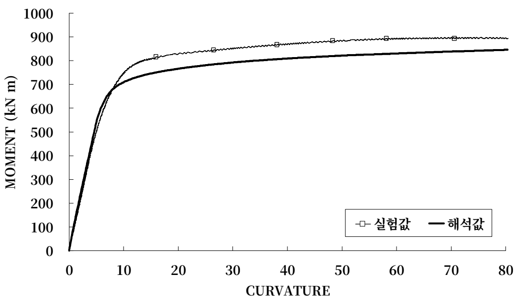
(a) 압축부 좌굴을 고려하지 않은 경우



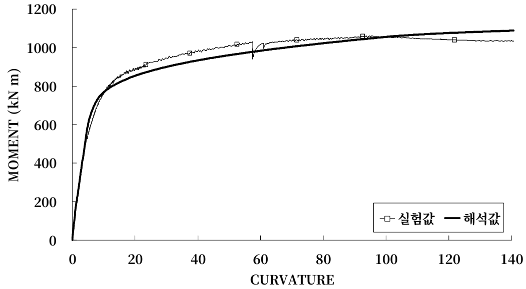
(b) 압축부 좌굴을 고려한 경우
Fig. 10 중공강관의 모멘트-곡률 관계



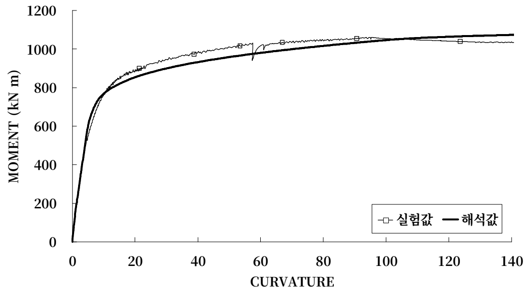
(a) 압축부 좌굴을 고려하지 않은 경우



(b) 압축부 좌굴을 고려한 경우
Fig. 11 경량기포콘크리트 충전강관의 모멘트-곡률 관계



(a) 압축부 좌굴을 고려하지 않은 경우



(b) 압축부 좌굴을 고려한 경우
Fig. 12 보통콘크리트 충전강관의 모멘트-곡률 관계

해석값이 실험값보다 약간 작은 것은 Mander에 의하여 제안된 식이 보통콘크리트에 대하여 유도된 식으로서 경량기포콘크리트의 특성을 반영하는데는 약간의 차이를 갖는 것으로 판단된다. 또한, 원형강관에 강도가 낮은 경량기포콘크리트를 충전하더라도 압축부의 좌굴현상의 고려여부는 해석결과에 별다른 영향을 미치지 않음을 알 수 있으며, 실험결과도 갑작스러운 파괴 없이 상당한 연성을 발휘함을 볼 수 있다.

Fig. 12는 일축압축강도 27MPa를 갖는 보통콘크리트를 충전한 콘크리트 충전 원형강관의 모멘트-곡률 관계를 나타내고 있다. 보통콘크리트를 충전한 경우에는 해석값이 실험값에 거의 일치함을 알 수 있으며, 압축부의 좌굴의 고려여부는 해석결과에 영향을 주지 않음을 알 수 있었다. 따라서, 본 연구에서 개발한 콘크리트 충전 원형강관의 모멘트-곡률 관계 해석방법은 콘크리트 충전 원형강관의 모멘트-곡률 관계를 나타내는데 적절하다고 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 순수 휨을 받는 중공 원형강관, 내부에 경량기포콘크리트 및 보통콘크리트를 충전한 원형강관 부재에 대하여 강재의 압축부에 대한 좌굴특성을 고려하고, 충전된 콘크리트의 삼축압축응력 발생에 따른 강도증가 현상을 고려하여 모멘트-곡률 관계를 계산하였다. 또한 기존의 실험자료를 이용하여 본 연구에서 개발된 모멘트-곡률 관계 계산방법의 유효성을 검증하였다.

중공강관의 경우, 압축부의 응력-변형률 관계는 좌굴의 영향을 고려하여 탄성-소성상태로 고려하며, 인장부는 변형률 경화와 변형률 연화현상을 고려하여 해석한 결과 강관의 압축부 좌굴에 의한 갑작스러운 파괴형상을 해석적으로 시뮬레이션 할 수 있었다.

원형강관에 압축강도와 단위중량이 낮은 경량기포콘크리트를 충전한 경우에는 해석값이 실험값보다 약간 작게 모멘트를 추정하였으나, 원형강관 내부에 경량기포콘크리트를 충전하더라도 해석적으로 간편하게 모멘트-곡률 관계를 계산할 수 있다는 것을 확인하였다.

원형강관에 보통콘크리트를 충전한 경우에는 해석값이 실험값에 근접한 결과를 추정함을 알 수 있었으며, 원형강관 내부에 경량기포콘크리트나 보통콘크리트를 충전함에 따라 강관 압축부의 좌굴의 고려여부는 결과에 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다. 따라서, 본 연구에서 개발된 모멘트-곡률 관계 계산방법은 콘크리트 충전 원형강관 거더의 모멘트-곡률 관계 계산에 적용 가능함을 확인하였다.

참고문헌

1. 정철헌, 진병무, 김인규, 김성운, “중공강관 및 콘크리트 충전강관의 휨 실험”, 대한토목학회 논문집, 제24권 제4A호, 2004, pp.807-816.
2. 한국건설기술연구원, “콘크리트 충전 강관거더의 설계 및 시공에 관한 연구”, 2005.
3. K.A.S. Susantha, H. Ge, T. Usami, “Uniaxial stress-strain relationship of concrete confined by various shaped steel tubes”, Engineering Structures 23, 2001, pp.1331-1347.
4. M. Elchalakani, X.L. Zhao, R.H. Grzebieta, “Concrete-filled circular steel tubes subjected to pure bending”, Journal of Constructional Steel Research 58, 2001, pp.1141-1168.
5. M.K. Chryssanthopoulos, Y.M. Low, “A method for predicting the flexural response of tubular members with non-linear stress-strain characteristics”, Journal of Constructural Steel Research 57, 2001. pp.1197-1216.
6. S. Nakamura, Y. Momiyama, T. Hosaka, K. Homma, “New technologies of steel/concrete composite bridges”, Journal of Constructional Steel Research 58, 2002, pp.90-130.
7. W.F. Chen, “Plasticity in Reinforced Concrete”, McGraw-Hill, 1982.

(접수일자 : 2005년 5월 19일)