프리텐션된 콘크리트 부재의 프리스트레스 도입시 허용압축응력에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on Allowable Compressive Stress at Prestress Transfer in Pre-Tensioned Concrete Members

이 정 연¹⁾ 이 득 행²⁾ 김 강 수^{3)*} 박 민 국⁴⁾ 윤 상 천⁵⁾
Lee, Jeong Yeon Lee, Deuck Hang Kim, Kang Su Park, Min Kook Yoon, Sang Chun

Abstract

In the previous research, allowable compressive stress was analyzed based on strength theory, in which primary effect factors on the allowable compressive stress, such as eccentricity ratio, section type, section size, prestress and self-weight moment, were considered. As its results, allowable compressive stress equations were proposed. As a series of the previous research, this paper presents an experimental study on the prestress at transfer of pre-tensioned members with different eccentricity ratios. The results shows that ACI318-08 and EC2-02 are unconservative for the members under low eccentricity ratios, and they are conservative for the members under high eccentricity ratios. Compared to the code provisions, the results indicates that the proposed equation reasonably well evaluates the allowable compressive stresses for those with different eccentricity ratios.

Keywords : Allowable compressive stress, Eccentricity ratio, Prestress, Pre-tensioned member, Strength theory

1. 서 론

프리텐션(Pre-tension) 구조형식은 프리텐션 베드에 정착시킨 긴장재의 고정을 풀어줌으로써 긴장재와 콘크리트 사이의 부착에 의하여 프리스트레스를 도입하는 방식이다. 이 때 프리스트레스가 초기재령 콘크리트에 도입되기 때문에 현행의 설계기준에서는 부재에 발생될 수 있는 압축손상 및 인장균열을 방지하고자 허용압축응력을 제시하고 있다. 프리스트레스의 도입 시점은 허용압축응력에 따라 결정될 수 있으며, 만약 도입 시점이 과도하게 빠르면 부재의 구조적 성능이 저하될 수 있고, 이와 달리 도입 시점이 늦어지면 프리캐스트 공장에서 부재를 제작하는 공정 사이클이 연장되어 공기가 지연될 수 있다. 따라서 프리텐션 콘크리트 부재에서 허용압축응력은 구조적 성능 및 경제성을 결정지을 수 있는 중요한 설계기준이다. 그러나 현행의 국내·외 설계기준은 과거로부터 결정되어온 기준을 그대로 고수하고 있어, 다소 과도하게

안전측으로 기준을 제한하고 있다. 프리스트레스 콘크리트 부재 제작시 허용압축응력 기준을 만족시키기 위해 긴장재와 콘크리트 사이의 부착을 제거하는 디본딩(debonding)을 하거나 콘크리트의 압축강도를 빠른 시일 안에 증진시킬 수 있는 증기양생방법을 사용하고 있다.

최근 개정된 ACI 318-08은 실험적 연구를 바탕으로 허용압축응력을 종래의 $0.60f_{ci}$ 에서 $0.70f_{ci}$ 으로 상향조정하였다. 하지만, 개정된 ACI 318-08 기준은 이론모델 없이 실험 근거를 바탕으로 결정된 기준이며, 다양한 변수에 따라 허용압축응력이 변화할 수 있음에도 불구하고 고정된 수치로 기준이 제한되어 있기 때문에 정확한 프리스트레스의 도입 시점을 예측하는데 한계가 있다. 따라서 이 연구의 선행연구에서는 강도이론을 바탕으로 영향인자들(편심비(e/h), 단면크기, 프리스트레스 및 자중모멘트)을 반영한 해석단면에 대해 허용압축응력을 해석하였고, e/h 에 따른 허용압축응력계수(K) 산정식을 제안하였으며, Castro et al.의 실험결과를 바탕으로 제안식을

1) 정회원, 서울시립대학교 건축공학과 공학석사
2) 정회원, 서울시립대학교 건축공학과 박사과정
3) 정회원, 서울시립대학교 건축학부 건축공학과 부교수, 교신저자
4) 정회원, 서울시립대학교 건축공학과 석사과정
5) 정회원, 경주대학교 건축학부 교수

* Corresponding author : kangkim@uos.ac.kr 02-2210-5707

• 본 논문에 대한 토의를 2012년 8월 31일까지 학회로 보내주시면 2012년 9월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

검증하였다. 그러나 e/h 가 낮은 실험체의 수는 매우 부족하였기 때문에 제안식을 정확하게 검증하는데 어려움이 있다.

따라서 이 연구에서는 서로 다른 편심비(e/h)와 도입 압축응력을 갖는 장방형 단면의 프리텐션콘크리트 보 부재 4개를 제작하여 프리스트레스 도입 실험을 수행하였으며, 실험결과를 토대로 제안식을 상세하게 평가하고자 한다.

2. 선행연구에 대한 고찰

2.1 현행설계기준의 허용압축응력(Kf_{ci})

현행의 설계기준에서 최대압축응력(f_b)은 허용압축응력(Kf_{ci})을 넘지 않도록

$$Kf_{ci} \geq f_b \quad (1)$$

식 (1)과 같이 제시되어 있으며, 허용압축응력계수(K)는

$$K = \frac{f_b}{f_{ci}} \quad (2)$$

와 같이 산정될 수 있다. 여기서, 압축응력인 f_b 는

$$f_b = \frac{P_i}{A_g} + \frac{P_i e}{I_g} y_b - \frac{M_g}{I_g} y_b \quad (3)$$

을 통해 계산될 수 있다. 여기서 P_i 는 초기프리스트레스 힘이며, A_g 는 콘크리트 단면의 면적, e 는 긴장재의 도심으로부터 콘크리트 단면의 중립축까지 떨어진 거리, I_g 는 단면2차모멘트, y_b 는 중립축으로부터 부재의 하단까지 떨어진 거리이다. Fig. 1은 각국의 설계기준 및 연구자들이 제안한 허용압축응력을 단면높이(h)에 대한 중립축으로부터 단면 최하단까지 거리(y_b)의 비율인 편심비(centroid ratio, y_b/h)에 대해 나타냈다. KCI-07, CSA-04 및 AASHTO-LRFD에서는 허용압축응력을 $0.60f_{ci}$ 으로 제한하고 있으며, ACI318-08 및 EC2-02에서는 허용압축응력을 $0.70f_{ci}$ 으로 제한하고 있다. AIJ는 설계압축강도(f_{ck})의 함수로 허용압축응력을 제시하고 있으며, Fig. 1에 콘크리트의 프리스트레스 도입 시 압축강도(f_{ci})가 $0.50f_{ci}$, $0.65f_{ci}$ 및 $0.80f_{ci}$ 인 경우에 대하여 각각 표현

Fig. 1 Current code provisions

하였다. 현행 설계기준들의 공통점은 고정된 수치로 허용압축응력을 제시하고 있으며, 특히 KCI-07, CSA-04 및 AASHTO-LRFD는 상대적으로 낮은 허용압축응력 제한값을 가지는 것을 알 수 있다. 현행의 기준들과는 다르게, Noppakunwijai et al.의 제안식에서는 y_b/h 가 높아질수록 허용압축응력이 증가되며, 이를 통하여 허용압축응력에 단면형상의 영향이 간접적으로 고려되고 있다. 그러나 이 역시 단면크기, 프리스트레스 및 자중모멘트 등의 주요 영향인자들의 영향을 반영하지 못하므로 이를 반영한 허용압축응력의 해석이 필요하다.

2.2 편심비에 따른 허용압축응력계수 산정식

선행연구에서는 허용압축응력인자들(편심비, 단면형상, 단면크기, 프리스트레스 크기 및 자중모멘트의 크기)을 반영한 해석단면에 대해 강도이론을 바탕으로 허용압축응력을 해석하였다. 프리스트레스 도입 시 콘크리트의 압축강도(f_{ci})는 다음 식 (4)와 식 (5)를 연립함으로써 산정될 수 있다.

$$0.85f_{ci}A_{cc} + A_{ps}\Delta f_{ps} - A_s f_s = \frac{1.2P_i}{\phi} \quad (4)$$

$$0.85f_{ci}A_{cc}y_{cc} + A_{ps}\Delta f_{ps}d_p' - A_s f_s d_s = \frac{\kappa}{\phi}(P_i d_p' + M_g) \quad (5)$$

여기서, A_{cc} 는 콘크리트 등가응력블록의 넓이, A_{ps} 는 긴장재량, Δf_{ps} 는 긴장재의 응력, A_s 는 상부철근량, f_s 는 상부철근의 응력, ϕ 는 강도감소계수, y_{cc} 는 부재의 하단

으로부터 콘크리트 등가응력블록의 도심까지 떨어진 거리, d_p' 는 부재 하단에서부터 긴장재 도심까지의 거리, d_s 는 부재 하단에서부터 상부철근 도심까지의 거리, κ 는 자중모멘트의 안전계수로 1.2를 적용하였고, M_g 는 부재의 자중에 의한 휨모멘트이다. 강도이론을 바탕으로 해석한 결과, 허용압축응력에 대한 편심비(e/h)의 영향이 가장 큼을 확인할 수 있었다. 해석결과를 바탕으로 Fig. 2에 보이는 바와 같이 최대 및 최소 포락선을 그렸으며, 포락선을 바탕으로 e/h 에 따른 허용압축응력계수(K) 산정식을 각 단면형상별로 다음과 같이 제안하였다.

$$K = \alpha(e/h) + \beta \leq K_{\max} \quad (6)$$

여기서, α , β 및 $K_{\max}$ 는 역T형단면의 경우에는 2.25, 0.50 및 0.70, 장방형단면의 경우에는 1.32, 0.55 및 0.75 그리고 T형단면의 경우 2.25, 0.35 및 0.80이다.

Fig. 2에는 Castro et al.의 실험결과를 같이 보여주고 있으며, 이를 바탕으로 제안식 및 기준들을 간단히 평가해 볼 수 있다. R2-75-2 실험체는 ACI318-08 및 EC2-02의 설계기준인 $0.70f_{ci}$ 보다 낮은 $0.65f_{ci}$ 가 도입되었는데도 불구하고 부재의 단부에서 좌열균열(bursting crack)이 발생하였다. 이는 ACI318-08 및 EC2-02의 설계기준이 낮은 편심비(e/h)를 갖는 부재의 허용압축응력(Kf_{ci})을 비안전측으로 결정하고 있음을 의미한다. 또한 e/h 가 높은 R3-75계열의 경우 $0.75f_{ci}$ 에서 $0.78f_{ci}$ 사이의 범위에 해당하는 압축응력이 도입되었음에도 불구하고 부재에 어떠한 압축손상 및 인장균열도 발생되지 않았다. 이는 현행의 설계기준이 높은 e/h 를 갖는 부재의 허용압축응력을 과도하게 안전측으로 규정하고 있음을 확인할 수 있다. 그에 반해 제안식은 e/h 의 고저에 따라 허용압축응력을 다르게 제시함으로써 실험체의 결과를 비교적 근사하게 예측하고 있는 것을 볼 수 있다. 그러나, 낮은 e/h 를 갖는 실험체의 수가 매우 적기 때문에 제안식의 정확한 검증에 한계가 있다.

따라서 이 연구에서는 장방형 단면의 허용압축응력계수(K) 산정식을 심도있게 검증하고, 허용압축응력(Kf_{ci})에 관한 기초적인 데이터베이스를 구축하기 위하여 편심비(e/h) 및 Kf_{ci} 가 서로 다른 프리텐션 보 부재 4개를 제작하였으며, 각 실험체에 대하여 프리스트레스 도입 실험을 수행하였다.

(a) Inverted T section

(b) Rectangular section

(c) T section

Fig. 2 Effect of e/h in the proposed equation

3. 실험상세

3.1 실험계획

선행연구에서는 영향인자들을 반영한 해석단면에 대해 강도이론을 바탕으로 허용압축응력(Kf_{ci})을 해석하였고, 해석결과를 토대로 허용압축응력계수(K) 산정식을 제안하였다. 이 연구에서는 제안식을 검증하기 위해 편심비(e/h)가 서로 다른 프리텐션 보 실험체 4개를 제작하여 프리스트레스 도입 실험을 하였다.

실험체의 단면형상은 실무에서 일반적으로 사용되고 있는 장방형 단면이며, R1 및 R2 실험체의 편심비(e/h)는 각각 0.006 및 0.01이고, 허용압축응력(Kf_{ci})은 ACI318-08 및 EC2-02의 설계기준인 $0.70f_{ci}$ 보다 약 7% 낮은 $0.65f_{ci}$ 이다. R1 및 R2 실험체는 선행연구의 제안식인 식 (6)을 통해 확인할 수 있듯이 낮은 e/h 를 갖는 프리텐션 부재의 경우 ACI318-08 및 EC2-02의 설계기준($0.70f_{ci}$)이 Kf_{ci} 를 비안전측으로 결정하고 있음을 실험 결과로 확인하기 위해 계획된 실험체이다. R3 및 R4 실험체의 e/h 는 각각 0.276 및 0.271이고, Kf_{ci} 는 현행의 설계기준보다 높은 $0.73f_{ci}$ 이다. R3 및 R4 실험체는 현행의 설계기준이 높은 e/h 에서의 Kf_{ci} 를 과도하게 안전측으로

평가하고 있음을 확인하기 위해 계획된 실험체이다.

3.2 실험체 상세

Table 1은 각 실험체의 단면특성을 정리한 내용이다. Table 1을 통해 확인할 수 있듯이 R1 실험체의 폭(b)은 125 mm이고, 단면의 높이(h)는 300 mm이다. R2, R3 및 R4 실험체의 폭(b)은 200 mm이며, 높이(h)는 R1 실험체의 높이와 동일한 300 mm이다. R1 및 R2 실험체의 평균선압축응력(f_{ave})은 각각 19.35 MPa, 18.50 MPa이며, R3 및 R4 실험체의 f_{ave} 는 각각 8.27 MPa, 8.35 MPa이다. R1 및 R2 실험체의 편심비(e/h)는 매우 낮기 때문에 단면 상부에 인장응력이 거의 발생하지 않으므로 균열을 제어하기 위한 상부철근은 배근되지 않는다. 이에 반해 높은 e/h 를 갖는 R3 및 R4 실험체는 단면 상부에 인장응력이 크게 발생하기 때문에 인장강도를 초과하므로 균열제어를 위해 Fig. 3에 보이는 바와 같이 D10 철근을 2개씩 배근하였다. 실험체의 정착부 영역에서 프리스트레스 도입시 발생되는 파열력에 저항하기 위하여 철근량(A_s)은

$$A_s = P_r / f_s \quad (7)$$

Table 1 Specimen details

Specimen	b (mm)	h (mm)	e/h^*	Kf_{ci}^{**} (MPa)	f_{ci}^+ (MPa)	f_{ave}^{++} (MPa)	Top bonded reinforcement	Bursting reinforcement (2 legs)	Length of member (mm)
R1	125	300	0.006	$0.66f_{ci}$	29.5	19.35	N	2-D10	4000
R2	200	300	0.010	$0.65f_{ci}$		18.50	N	2-D10	
R3	200	300	0.276	$0.73f_{ci}$		8.27	2-D10	1-D10	
R4	200	300	0.271	$0.73f_{ci}$		8.35	2-D10	1-D10	

* : Eccentricity ratio, ** : Allowable compressive stress,

+ : Compressive strength of concrete at release, ++ : Average compressive stress ($=P_g/A_g$)

Fig. 3 Specific description of specimens

으로 설계되었으며, 이는 AASHTO-LRFD의 설계기준을 따른 것이다. 여기서, P_r 은 도입 프리스트레스 크기의 4 %에 해당하는 수치이고, f_s 는 파열철근의 응력으로 $0.50f_y$ (f_y 는 철근의 항복강도)이다. 실험체의 길이는 4개의 실험체 모두 동일하게 4000 mm이며, 프리스트레스 도입 시 압축강도(f_{ci}) 역시 동일하게 29.5 MPa이다.

3.3 긴장작업 및 긴장력 측정

프리텐션(Pre-tension)구조의 경우 긴장재는 콘크리트를 타설하기 전 미리 긴장되어야 하므로, Photo 1 (a)에서 확인할 수 있듯이 프리텐션 베드의 바닥 위에 각 실험체들의 거푸집을 설치한 다음 7연선 저이완 긴장재를 배치하였다. 그다음, Photo 1 (b)에 보이는 바와 같이 유압펌프를 이용하여 긴장작업을 진행하였으며, Photo 1 (c)에 보이는 바와 같이 썰기를 이용하여 긴장재를 프리텐션 베드에 정착시켰다. 긴장작업(Jacking)은 Fig. 4에 나타난 것 과 같이 R3, R4, R1, R2 실험체의 순서로 진행되었다. R3 실험체의 경우 12, 13, 14, 15, 16번 긴장재의 순서로, R4 실험체의 경우 7, 8, 9, 10, 11번 긴장재의 순서로, R1 실험체의 경우 1, 2, 3, 4, 5, 6번 긴장

재의 순서로, R2 실험체의 경우 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26번 긴장재의 순서로 긴장되었다.

긴장작업(Jacking) 시 프리스트레스 힘이 각 실험체에 정확하게 도입되기 위하여 로드셀 및 변형률 게이지를 이용하여 긴장력을 측정하면서 진행하였다. R1 실험체의 경우 5번 긴장재의 위치에 로드셀이 장착되었고, R2 실험체의 경우 25번 긴장재의 위치에, R3 실험체의 경우 14번 긴장재의 위치에, R4 실험체의 경우 9번 긴장재의 위치에 로드셀을 장착하였다. 변형률 게이지는 Fig. 4에 표시한 바와 같이 단부로부터 전달길이(Transfer length)만큼 떨어진 위치와 지점으로부터 80 mm 떨어진 위치 및 단부로부터 2 m 떨어진 위치(부재의 중앙부, mid-span)에 부착되었다. 변형률 게이지가 단부로부터 전달길이만큼 떨어진 위치에 부착된 긴장재는 R1 실험체의 1번 및 5번 긴장재, R2 실험체의 17번 및 25번 긴장재, R3 실험체의 14번 긴장재와 R4 실험체의 9번 긴장재이며, 지점으로부터 80 mm 떨어진 위치에 부착된 긴장재는 R1 실험체의 3번 긴장재, R2 실험체의 22번 긴장재, R3 실험체의 12번 긴장재와 R4 실험체의 7번 긴장재이고, 부재의 중앙부에 부착된 긴장재는 R1 실험체의 6번 긴장재, R2 실험체의 26번 긴장재, R3 실험체의 16번 긴장재와

Photo 1 Placement of specimens and equipments

Fig. 4 Tendon names of specimens

R4 실험체의 11번 긴장재이다.

3.4 재령일에 따른 콘크리트 공시체의 압축응력

프리스트레스 도입 직전에 공시체의 압축강도 실험을 수행하였으며, 모든 실험체의 프리스트레스 도입시 압축강도(f_{ci})는 29.5 MPa 이었다. 제작된 압축공시체의 크기는 $\phi 100\text{ mm} \times H200\text{ mm}$ 이며, 압축기의 가력속도는 ASTM C 391)에서 제시한 기준에 따라서 1초당 0.13 MPa ~ 0.34 MPa로 수행되었다. Fig. 5는 재령일에 따른 공시체의 평균 압축응력을 정리한 그림이며, 재령일이 18일이 되었을 때 공시체의 압축강도는 목표강도인 약 29.5 MPa에 도달하였다.

3.5 프리스트레스 힘의 도입 순서

Photo 2 (a)에 보이는 바와 같이 프리텐션베드에 정착된 긴장재는 부재의 한쪽 단부인 Transfer ① 구역에서

Fig. 5 Compressive strengths at different ages

먼저 절단된 다음, 다른 쪽 단부인 Transfer ② 구역에서 절단되었다. Photo 2 (b)는 산소절단기를 이용하여 긴장재를 절단하는 모습이며, 프리스트레스의 도입(Transfer of prestress)은 Fig. 4에 나타내었듯이 R1, R4, R3, R2 실험체의 순서로 진행되었다. R1 실험체의 경우 1, 2, 3, 4, 5, 6 번 순서로, R4 실험체의 경우 7, 8, 9, 10, 11번 순서로, R3 실험체의 경우 12, 13, 14, 15, 16번 순서로 긴장재를 절단하였다. R2 실험체는 다른 실험체들과 다르게 17, 26, 19, 25, 20, 24, 21, 22, 18, 23번 순서로 긴장재를 절단하여 상하좌우 대칭으로 프리스트레스를 도입하였다.

4. 실험결과

4.1 도입 프리스트레스 크기

Fig. 6은 각 실험체에 도입된 프리스트레스의 크기를 나타낸 그림이다. R1 실험체의 경우, 1, 2번 긴장재를 절단함으로써 각각 115.6 kN의 프리스트레스가 도입되었으며, 3, 4번 긴장재를 절단함으로써 각각 123.2 kN, 9,

Fig. 6 Prestressing forces of specimens

(a) Transfer zone

(b) Transfer process

Photo 2 Transfer of prestress

(a) Front (Transfer①)

(b) Front (Transfer②)

(c) Side 1 of Transfer①

(d) Side 2 of Transfer①

Photo 3 R1 after transfer prestress

5, 6번 긴장재를 절단함으로써 각각 123.5 kN의 프리스트레스가 도입되어, 총 723.1 kN의 프리스트레스가 R1 실험체에 도입되었다. R2 실험체에는 총 1108.4 kN, R3 실험체에는 총 495.6 kN, R4 실험체에는 총 500.4 kN의 프리스트레스가 도입되었다.

4.2 프리스트레스 도입 후 파괴양상

Photo 3은 R1 실험체에 프리스트레스를 도입한 후의 사진이다. Photo 3(a)에 보이는 바와 같이 프리스트레스 도입 직후 R1 실험체의 단부(Transfer ① 구역)에 극심한 압축손상이 발생된 것을 볼 수 있다. 단면의 하단으로부터 150 mm 떨어진 정면의 위치에 균열폭이 0.05 mm인 파열균열이 발생하였으며, Photo 3(c) 및 (d)에서 확인할 수 있듯이 이 균열은 부재의 측면으로 이어져 부착균열이 되었다. 이 부착균열의 길이는 약 70 mm이며, 균열폭은 0.10 mm에서 0.20mm 사이의 범위에 해당한다. 또한 단면의 하단으로부터 50 mm 떨어진 정면의 위치에 최대 균열폭이 3.0 mm인 파열균열이 발생하였고, 이 균열 역시 측면으로 이어져 부착균열이 되었다. 이 부착균열의 길이는 약 300 mm이고, 최대 균열폭은 0.50 mm이다. Transfer ② 구역의 단부에서는 Photo 3(b)에서도 볼 수 있듯이 어떠한 균열도 발생되지 않았다.

R1 실험체와 달리 R2, R3 및 R4 실험체의 단부에서는 Photo 4, 5 및 6에 보이는 바와 같이 어떠한 균열도 관찰되지 않았다.

5. 실험결과 분석

Fig. 7에는 이 연구에서 진행된 실험결과, Castro et al.의 실험결과를 허용압축응력산정식 및 현행의 설계기준과 비교하여 나타내었다. R1 실험체의 e/h 는 약 0.006이고,

(a) Front (Transfer①)

(b) Front (Transfer②)

Photo 4 R2 after transfer prestress

(a) Front (Transfer①)

(b) Front (Transfer②)

Photo 5 R3 after transfer prestress

허용압축응력(Kf_{ci})은 KCI-07, AASHTO-LRFD 및 CSA-04의 설계기준인 $0.60f_{ci}$ 보다 높고, ACI-08 및 EC2-02의 설계기준인 $0.70f_{ci}$ 보다 낮으며, 제안식인 식 (6)에서 제시하고 있는 $0.55f_{ci}$ 보다 높은 값인 $0.66f_{ci}$ 이다. 프리스트레스를 도입한 결과, R1 실험체의 단부에 극심한 압축손상이 발생되었다. R2 실험체의 e/h 는 약

(a) Front (Transfer①)

(b) Front (Transfer②)

Photo 6 R4 after transfer prestress

Fig. 7 Verification of the proposed equation

0.01이고, Kf_{ci} 는 식 (6)을 통해 결정된 값인 $0.56f_{ci}$ 보다 높은 값인 $0.65f_{ci}$ 이다. 그러나 R2 실험체의 경우 프리스트레스를 도입하였을 시 부재의 단부에 어떠한 손상도 발생되지 않았다. R2 실험체의 Kf_{ci} 는 해석결과를 바탕으로 그려진 최대포락곡선을 초과하지 않은 반면에 R1 실험체의 Kf_{ci} 는 최대포락곡선을 초과한 것을 알 수 있으며, 이는 R2 실험체에 압축손상이 발생되지 않은 점과 R1 실험체에 압축손상이 발생된 점을 해석결과가 잘 평가하고 있다는 것을 보여준다. 또한 e/h 가 0.07이고, Kf_{ci} 가 $0.65f_{ci}$ 인 Castro et al.의 실험체 R2-75-2는 프리스트레스 도입 후에 프리텐션 단부에서 좌열균열이 크게 발생하였다. R2-75-2의 Kf_{ci} 가 제안식에서 제시하고 있는 수치인 $0.64f_{ci}$ 보다 큰 것을 볼 수 있으며, 이 경우에도 프리스트레스 도입시 손상을 제안식이 잘 반영하고 있다는 것을 의미한다. 반면에, ACI318-08 및 EC2-02

의 설계기준에서 제안하는 Kf_{ci} 는 R1 실험체 및 R2-75-2 실험체의 도입응력 보다 큰 값이며, 이는 이 실험체들의 손상결과를 잘 반영하지 못하고 있다는 것을 의미한다. 즉, ACI318-08 및 EC2-02의 설계기준은 낮은 e/h 에서의 Kf_{ci} 를 비안전측으로 결정하고 있는 것이다.

R3 실험체의 편심비(e/h)는 약 0.28이며, 허용압축응력(Kf_{ci})은 현행의 설계기준보다 높고, 식 (6)을 통해 결정되는 값인 $0.75f_{ci}$ 보다 낮은 $0.73f_{ci}$ 이다. R4 실험체의 e/h 는 약 0.27이고, Kf_{ci} 는 R3 실험체와 동일한 $0.73f_{ci}$ 이다. 프리스트레스 도입 시, R3 및 R4 두 실험체에서 모두 부재단부에 어떠한 압축손상도 발견되지 않았다. 이는 R3 및 R4 실험체의 Kf_{ci} 가 제안식에서 제시하고 있는 $0.75f_{ci}$ 보다 안전측인 점과 잘 일치되고 있다. 또한 R3-76 계열의 Kf_{ci} 는 $0.75f_{ci}$ 보다 높음에도 불구하고 어떠한 균열도 관찰되지 않았다. R3, R4 및 R3-76 계열의 실험결과를 통해 파악할 수 있듯이 현행의 설계기준은 높은 e/h 에서 Kf_{ci} 를 과도하게 안전측으로 제한하고 있다는 것을 알 수 있다.

6. 결론

이 연구에서는 편심비(e/h)가 서로 다른 프리텐션 보 실험체 4개에 대하여 프리스트레스 도입 실험을 하였으며, 이 연구 및 Castro et al.의 실험결과를 토대로 제안식 및 현행의 국내외 설계기준을 비교분석한 결과 다음과 같은 결론에 도달하였다.

- (1) 도입압축응력이 약 $0.66f_{ci}$ 인 R1 실험체에 극심한 압축손상이 발생되었으며, 이는 허용압축응력(Kf_{ci}) 최대포락곡선을 초과하게 나타나서 해석결과와 일치하는 것을 알 수 있었다.
- (2) 도입압축응력이 $0.75f_{ci}$ 로서 매우 높은 R2, R3 및 R4 실험체들에서는 어떠한 균열도 관찰되지 않았으며, 이는 허용압축응력(Kf_{ci}) 최대포락곡선을 초과하지 않게 나타나서 해석결과와 일치하는 것을 알 수 있었다.
- (3) R1 및 R2-75-2의 Kf_{ci} 는 ACI318-08 및 EC2-02의 설계기준인 $0.70f_{ci}$ 보다 낮은 약 $0.66f_{ci}$ 임에도 불구하고 부재에 압축손상이 발생되었으며, 이

는 ACI318-08 및 EC2-02의 설계기준이 낮은 e/h 를 갖는 프리텐션 부재의 Kf_{ci} 를 비안전측으로 결정하고 있다는 것을 알 수 있다.

- (4) R3, R4 및 R3-76 계열의 Kf_{ci} 는 현행의 설계기준보다 높은 $0.75f_{ci}$ 임에도 불구하고 부재에 어떠한 균열도 관찰되지 않았으며, 이는 현행의 설계기준이 높은 e/h 를 갖는 프리텐션 부재의 Kf_{ci} 를 과도하게 안전측으로 제한하고 있다는 것을 알 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임. (No. 2010-0003728)

참고문헌

1. 김영진, 이상민, 이기성, “균열손상을 입은 프리스트레스트 콘크리트관의 안전도분석”, 구조물진단학회지, 제2권 3호, 1998, pp.168-175.
2. 오병환, 양인환, 김지상, “프리스트레스트 콘크리트 박스거더 교량의 프리스트레스 손실 추정에 관한 연구”, 구조물진단학회지, 제5권 2호, 2001, pp.111-120.
3. 이득행, 이정연, 임주혁, 김강수, “T형 및 역T형 단면을 가지는 프리텐션부재의 프리스트레스 도입시 허용압축응력”, 한국콘크리트학회논문집, 제23권 3호, 2011, pp.353-364.
4. 이정연, 이득행, 김강수, 황진하, 임주혁, 이진섭, “장방형 단면을 갖는 프리텐션부재의 프리스트레스 도입시 허용압축응력”, 대한건축학회논문집(구조제), 제27권 5호, 2011, pp.57-67.
5. 한국콘크리트학회, “콘크리트구조설계기준해설”, 2007, p.523.
6. ACI Committee 318, “Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary(ACI 318M-08)”, American Concrete Institute, Farmington Hills, 2008, p.473.
7. American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, Third Edition, AASHTO, Washington, DC, 2007, p.1450.
8. Architectural Institute of Japan, Standard for Structural Design and Construction of Prestressed Concrete Structures, Architectural Institute of Japan, 1998, p.474.
9. Castro, A., Kreger, M., Bayrak, O., Breen, J. E. and Wood, S., “Allowable Design Release Stresses for Pretensioned Concrete Beams”, Report No. FHWA/TX-04/0-4086-2, Center for Transportation Research, University of Texas, Austin TX, 2004, p.127.
10. Collins, M. P. and Mitchell, D., Prestressed Concrete Structure, Prentice Hill, 1991, p.766.
11. Comité Européen de Normalisation(CEN), Eurocode 2 : Design of Concrete Structures-Part 1-1 General Rules and Rules for Buildings, prEN 1992-1, 2002, p.211.
12. CSA Committee A23.3-04, Design of Concrete Structures, Canadian Standards Association, 2004, p.232.
13. Noppakunwijai, P., Tadros, M. K., Ma, J. Z. and Mast, R. F., “Strength design of pretensioned flexural concrete members at prestress transfer”, PCI Journal, vol. 46, No. 1, 2001, pp.34-52.

(접수일자 : 2012년 3월 2일)

(수정일자 : 2012년 4월 25일)

(심사완료일자 : 2012년 4월 30일)

요 지

선행연구에서는 강도이론을 바탕으로 영향인자들을 반영한 해석단면에 대해 허용압축응력(Kf_{ci})을 해석하였고, 해석결과를 바탕으로 허용압축응력산정식을 제안하였다. 이전 연구에 대한 일련의 연구로서, 본 연구에서는 서로 다른 편심비(e/h)를 갖는 프리텐션 보 부재에 대한 프리스트레스 도입 실험을 수행하였다. 실험결과를 토대로 제안식을 검증한 결과 낮은 e/h 를 갖는 프리텐션 부재의 경우, ACI318-08 및 EC2-02의 설계기준이 Kf_{ci} 를 비안전측으로 결정하고 있음을 확인하였다. 또한 높은 e/h 를 갖는 프리텐션 부재의 경우 현행의 설계기준은 Kf_{ci} 를 과도하게 안전측으로 제안하고 있다. 이에 비해 제안식은 e/h 에 따른 Kf_{ci} 를 합리적으로 평가하는 것으로 나타났다.

핵심 용어 : 프리스트레스, 프리텐션부재, 허용압축응력, 강도이론, 편심비