

PS강연선이 부식된 PSC보의 극한휨거동 평가실험

윤석구*

Youn, Seok-Goo*

Experimental Evaluation for Ultimate Flexural Behaviors of PSC beams with A Corroded Tendon

ABSTRACT

This paper presents experimental research work for the evaluation of ultimate flexural behaviors of prestressed concrete beams with a corroded tendon. In order to evaluate the effects of loss of prestress or loss of tendon area on the ultimate flexural strength of prestressed concrete beams, static load tests are conducted using five prestressed concrete beams. After exposing prestressing tendons in two test beams using 25mm drill bit, the exposed tendons were corroded using an accelerating corrosion equipment to simulate loss of tendon area. During the tests, steel strains, concrete strains and displacements at the center of test beams were measured, and acoustic emission measurements were conducted to detect wire fractures. Based on the test results, evaluation method for predicting flexural strength of prestressed concrete beams with corroded tendons is investigated. In addition, evaluation methods for predicting the existence of corroded tendons in post-tensioned prestressed concrete beams at service loads are discussed.

Key words : Bridges, Prestressed concrete, Flexural strength, Corrosion, Acoustic emission

초 록

이 논문에는 PS강연선이 부식된 PSC보부재의 극한휨거동을 평가하기 위해 수행한 실험연구를 수록하였다. 프리스트레스 감소와 PS강연선의 단면적 감소가 PSC보의 휨강도에 미치는 영향을 평가하기 위해 5개의 PSC보부재를 이용하여 정적하중 재하실험을 수행하였다. 두 개의 PSC 보부재는 드릴을 이용해 덕트 내부에 있는 PS강연선 표면을 노출시킨 후 부식촉진장치를 이용해 인위적으로 PS강선들을 부식시켰다. 실험부재의 파괴시까지 정적하중을 재하하면서 철근과 콘크리트의 변형률, 그리고 중앙부의 처짐량 변화를 측정하였으며 또한 음향센서를 콘크리트표면에 부착하여 부식된 PS강선의 파단을 모니터링하였다. 실험결과를 토대로 PS강선이 부식된 PSC보부재의 휨강도 평가방법을 분석하였다. 또한, 사용하중 작용시 후긴장된 PSC보부재 내부의 PS강연선의 부식 여부를 조기 예측할 수 있는 방법을 고찰하였다.

검색어 : 교량, 프리스트레스 콘크리트, 휨강도, 부식, 음향방출

1. 서론

프리스트레스드 콘크리트(이하 PSC)는 PS강재 등을 이용하여 미리 콘크리트에 프리스트레스를 도입시킨 구조를 말하며, PS강재는 콘크리트 내부에 매립되어 있기 때문에, 부식 등에 의한 PS강재의 단면적 감소가 없다는 가정을 토대로 설계되고 있다. 하지만 PS강재는 높은 인장응력으로 인한 응력부식뿐만 아니라 제설재가 사용되는 경우 콘크리트 내부로 침투하는 수분과 염소이온에 의해 쉽게 부식되어 파단되는 현상이 발생한다. 실제 겨울철 제설재가 사용되는 지역의 PSC교량의 경우 PS강재의 부식과 파단이 종종 발견되고 있으며(Halsall et al. 1996; The Concrete Society, 1996), 일부 PSC교량의 경우 급작스런 붕괴 사고가 발생하기도 하였다(Woodward et al. 1988;

* 정희원 · 서울과학기술대학교 건설시스템디자인공학과 부교수 (Corresponding Author · Department of Civil Engineering, Seoul National University of Science & Technology, Associate Professor · sgyou@seoultech.ac.kr)

Received October 12 2012, Revised March 18 2013, Accepted April 23 2013

Mathy et al. 1996).

PSC보의 휨강도 저하는 크게 두가지 형태로 구분할 수 있는데, 첫 번째는 열화 등에 의한 압축부 콘크리트의 손상과 부식에 의한 PS 강재와 철근의 단면적 감소와 같이 휨강도에 영향을 미치는 단면적 감소이며, 두 번째는 초기 시공시 프리스트레스의 도입량 부족과 크리프와 건조수축에 의한 프리스트레스 감소에 의한 요인이다. 교량의 경우 압축부 콘크리트의 단면적 감소는 재포장 시공시를 포함한 유지관리시 쉽게 발견할 수 있으며, 또한 휨강도 평가를 위해 기존에 제시된 이론을 바로 적용할 수 있다. 또한 프리스트레스의 감소의 경우 교량과 같이 부재 높이가 크면 휨파괴시 PS강재의 극한 변형량이 크기 때문에 휨강도 감소에 미치는 영향이 크지 않다. 하지만 PS강재가 부식된 PSC보의 휨강도 평가를 위해서는 PS강재의 단면적 감소량 산정이 필요하며 또한 부식으로 손상된 PSC보의 휨강도 평가식 또는 기준이 필요하다(Park et al., 2008).

부식에 의한 PS강재의 단면적 감소량 산정시 정밀한 육안조사가 요구되는데, 프리텐션 공법으로 시공된 PSC보와 달리 포스트텐션 공법으로 시공된 PSC보의 경우, PS강재가 덕트 내부에 존재하여 부재 전체 걸쳐 육안조사가 불가능하기 때문에 일부 구간에 대한 육안조사만 가능하다. 그리고 PS강재가 부식된 PSC보의 극한 휨거동에 대한 기술적 자료가 부족하여 PS강재가 부식된 PSC보의 휨강도 평가를 위한 기준 또는 지침 등이 상세히 제시되어 있지 못한 실정이다. 이러한 이유로 제설재가 많이 사용되는 몇몇 국가에서는 PS강재에 부식이 발견된 PSC교량에 대해 휨강도 평가시 PS강재의 단면적을 무시하도록 규정하고 있다 (NSC, 2000; AASHTO, 2003). 또한 교량기술자는 보다 정밀한 평가지침이 없기 때문에 교량의 안전성 확보를 위해 손상된 교량의 철거 또는 보수보강을 선택을 할 수 밖에 없는 상황이다(Fricker et al., 2006). 국내의 PSC교량은 대부분 포스트텐션 공법으로 시공되어 향후 유지관리시 PSC교량의 휨강도 평가뿐만 아니라 안전성 확보를 위해 PS강재가 부식된 PSC 보의 극한 휨거동에 대한 연구가 수행될 필요성이 있다.

이 연구에서는 길이가 4m이고 PS 강재가 부식된 PSC보의 중앙부에 정적하중을 재하하여 파괴시까지 PSC보의 극한 휨거동을 관찰하였다. 부식된 PS강재를 모사하기 위하여 실험부재의 중앙부의 PS강재를 외부로 노출시킨 후 부식촉진장치를 이용하여 인위적으로 부식시켰다. 정적실험시 실험부재가 파괴에 도달할 때까지 처짐, 변형률, 균열폭 변화를 측정하였다. 또한 부식된 텐던의 조기 파단시 발생할 수 있는 음파를 모니터링하였다. 실험결과를 토대로 극한강도에 도달하기 전에 휨강도 저하를 조기 예측 가능한 방법들을 분석하였으며, PS 강재가 부식된 PSC보의 휨강도 평가 방법을 고찰하였다.

2. PSC보의 휨강도 감소 요인 고찰

PSC보의 휨강도를 평가하기 위해서는 휨강도에 영향을 미치는 요인을 고려해야 한다. 휨강도에 영향을 미치는 요인은 다음과 같이 크게 두 가지로 구분할 수 있다.

- (a) 프리스트레스의 크기 감소 : 초기 긴장력 도입 부족 크리프와 건조수축에 의한 시간의존적 감소
- (b) PSC보의 단면적 감소 : 압축력을 받는 콘크리트 단면적 감소 인장력을 받는 PS강재와 철근의 단면적 감소

위에 언급한 손상 요인을 휨강도 평가시 고려해야 되며 이에 대한 평가방법을 간략히 정리하였다.

2.1 프리스트레스의 감소

초기 긴장시 실수와 초기 도입된 프리스트레스의 시간의존적 감소에 의한 PSC보의 휨강도 저하는 단면의 형태와 밀접한 관련이 있는데, 소성중립축으로부터 압축을 받는 콘크리트 상면까지의 거리에 대해 소성중립축으로부터 PS강재의 도심까지의 거리의 비에 커다란 영향을 받는다. 이 비를 아래 식 1과 같이 R이라 하면 압축을 받는 콘크리트 단면의 폭이 작은 구조물은 R이 감소하고, PSC교량과 같이 교량바닥판이 압축을 받는 상부플랜지 역할을 하는 폭이 넓은 구조물은 R이 크다.

$$R = \frac{\text{소성중립축으로부터 PS강재 도심까지의 거리}}{\text{소성중립축으로부터 콘크리트 압축상단까지의 거리}} \quad (1)$$

R이 작은 구조물의 경우, 예를 들어 소성중립축이 압축을 받는 콘크리트단면 상면과 PS강재 도심의 사이의 중앙에 위치하는 경우 ($R = 1$)라면, 이 부재는 콘크리트의 극한변형률이 0.003mm/mm 일 때 파괴된다. 이때 PS강재의 변형률은 초기 긴장력에 의한 변형률에 0.003mm/mm 추가된 변형에 도달했을 때 파괴된다. PS강재의 경우 통상 항복변형률이 0.01mm/mm 부근이기 때문에 R이 작고 초기 프리스트레스 손실이 큰 부재의 경우 PS강재가 항복되기 전에 콘크리트의 압축 파쇄로 파괴된다. 따라서 초기 도입된 PS강재의 프리스트레스가 감소되는 경우 PSC부재의 휨강도가 감소하게 된다. R이 큰 구조물의 경우, 예를 들어 R이 4보다 큰 휨부재라면, 이 부재는 초기에 프리스트레스가 도입되지 않더라도 휨파괴시 압축을 받는 콘크리트 극한변형률이 0.003mm/mm 에 도달했을 때 PS강재의 변형률은 최소한 0.012mm/mm 를 초과하게 된다. PS강재의 응력-변형률 곡선으로부터 항복이후 응력-변형률의 기울기는 항복 이전보다 매우 작기 때문에 항복이후 PS강재가 발휘하는 인장력의 크기 변화는 매우 작다. 따라서 R이 4 이상인 구조물의

경우 초기 도입된 프리스트레스의 크기가 감소되더라도 실제 휨강도에 미치는 영향은 매우 작다. 국내 공용중인 PSC거더교의 경우 통상 R이 4보다 크기 때문에 프리스트레스의 감소에 따른 휨강도 저하는 매우 미미하다고 판단된다.

이상과 같이 PSC보의 휨강도 평가시 프리스트레스의 감소에 의한 영향을 고려해야 하며 손실을 고려한 유효프리스트레스의 크기를 이용한 변형률 적합조건을 이용하여 식 2을 이용하여 휨강도를 평가한다. 또한 현재 잔존하고 있는 프리스트레스의 크기는 응력해방방법(stress release method), 코어 드릴링방법(core-drilling method) 또는 슬롯 커팅방법(slot-cutting & flat-jacking method) 등을 이용할 수 있다(Kim et al., 2007).

$$M_n = A_{sp}f_{ps}(d_p - \frac{a}{2}) + A_s f_y (d - \frac{a}{2}) \quad (2)$$

여기서, A_{sp} 와 A_s 는 인장을 받는 PS강재와 철근의 단면적 f_{ps} 는 극한상태에서 PS강재의 인장응력을 나타내며, f_y 는 철근의 항복응력을 나타낸다.

2.2 PSC보의 단면적 감소

프리스트레스의 감소와 달리 PSC보의 단면적 감소에 의한 휨강도 저하는 단면의 형상과 관련없이 모두 커다란 영향을 미칠 수 있다. PSC보 부재에 대해 휨강도 저하에 영향을 미치는 단면적 감소에 대해 간략히 정리하였다.

2.2.1 압축을 받는 콘크리트의 단면적 감소

압축을 받는 콘크리트의 단면적 감소는 아래 식 3에서 ab부분에 해당한다. 주로 상부 압축철근을 보호하고 있는 콘크리트 피복 부위가 충분리되거나 또는 열화되는 현상에 의해 단면적 감소가 발생하며, 이 경우 식 3에서 ab와 d 수치에 영향을 미쳐 휨강도가 감소하게 된다.

$$M_n = 0.85f_{ck}ab(d - \frac{a}{2}) \quad (3)$$

여기서, ab는 압축을 받는 콘크리트의 단면적

PSC교량의 경우 콘크리트 피복 부위의 탈락과 열화는 교면방수 층의 손상에 의한 누수와 염소이온 침투 등으로 압축철근의 부식과 콘크리트의 동결융해 현상 등에 의해 발생한다. 이러한 손상은 교량관리주체에 의한 주기적인 유지관리 또는 교면 재포장 공사시 쉽게 발견할 수 있기 때문에 손상 초기에 보수를 통해 강도 저하에 대한 예방이 가능하다.

2.2.2 인장을 받는 PS강재와 철근의 단면적 감소

PSC보의 극한휨강도를 평가하기 위해서는 인장력을 받는 PS강재와 철근의 상태에 대한 정확한 평가가 선행되어야 한다. 이를 위해 특히 부식에 의해 PS강재의 단면적이 감소되었는지 여부를 조사해야 한다. 또한 PS강재에 부식이 발생된 경우에는 PS강재의 유효단면적을 산정해야 하며, PS강선의 조기 파단 현상에 의한 극한휨강도 감소와 연성도 저하현상을 고려해야 한다.

PS강재에 부식이 발생되지 않은 경우, PSC보의 휨강도는 PS강재의 단면적 손실이 없다는 가정하에 설계시 이용하는 식 2을 이용해 산정할 수 있다. 하지만, PS강재와 철근에 부식이 발생한 경우에는 부식된 PS강재의 단면적 ΔA_{sp} 와 부식된 철근의 단면적 ΔA_s 를 육안관찰을 통해 산정한 후 식 4를 이용해 휨강도를 산정해야 한다.

$$M_n = (A_{sp} - \Delta A_{sp})f_{ps}(d_p - \frac{a}{2}) + (A_s - \Delta A_s)f_y(d - \frac{a}{2}) \quad (4)$$

여기서, ΔA_{sp} 와 ΔA_s 는 각각 부식에 의한 PS강재와 철근의 단면적 감소량

식 4에 나타난 부식된 PS강재의 단면적 감소량 ΔA_{sp} 는 PS강재를 감싸고 있는 콘크리트와 쉬스등을 제거한 후 육안관찰을 통해 산정할 수 있다. 철근과 프리텐션공법으로 시공된 PS강재의 부식은 주로 누수와 콘크리트를 침투하는 염소이온 등에 의해 발생하는데, 콘크리트 표면으로부터 가까운 곳에서 먼저 시작하여 점차 콘크리트 내부에 매립된 철근과 PS강재로 진전된다. 즉, 부식에 의해 단면적 감소가 발생하며 통상 부식생성물이 콘크리트 표면으로 노출되거나 철근과 PS강재를 감싸고 있는 콘크리트에 균열이 발생하기 때문에 교량관리주체의 주기적인 육안관찰을 통해 쉽게 발견할 수 있다(Youn, 2000). 또한 이러한 손상은 누수되는 곳을 보수하거나 염소이온 등에 오염된 콘크리트를 제거하고 새로운 콘크리트로 보수를 실시하는 방법으로 휨강도 저하를 예방할 수 있다. 하지만 포스트텐션으로 시공된 PS강재의 경우 덕트 내부에 불충분한 그라우팅에 의해 공극이 존재하는 곳에 누수와 염소이온 침투 등이 침투하여 부식이 발생한다. 이 경우에 해당되는 PS강재의 부식은 육안관찰이 불가능하기 때문에 실제 휨강도 평가에 필요한 PS강재의 단면적 감소량을 정량적으로 판단하기 힘들다. 따라서 부식이 우려되는 곳에 대해 PS 강재를 감싸고 있는 콘크리트와 쉬스 등을 제거한 후 육안관찰하는 매우 공격적인 방법을 이용해야 한다(The Concrete Society, 1996; Fricker et al., 2006). 육안관찰시 부식된 PS강선은 충분한 연성거동을 보이기 이전에 쉽게 조기 파단되는 특성을 보이기 때문에 PS 강선 한가닥 한가닥에 대한 부식 정도를 세밀히 관찰해야하며, 육안조사 결과를 토대로 부식이 발생된 PS강재의 유효단면적을 산정해야 한다.

3. 휨강도 실험

3.1 실험 부재

PS강재의 부식이 PSC보의 휨강도 저하에 미치는 영향을 파악하기 위해 길이가 4m인 PSC보를 설계하였다. 앞 절에서 언급한 PSC보의 휨강도 저하 요인 중에서 실험 변수로 프리스트레스의 감소와 PS강재의 단면적 감소를 선택하였다. 길이는 4m, 단면적의 크기가 150 x 300mm인 PSC 보실험체 단면 상세를 Fig. 1에 나타내었으며, 실험부재명과 실험변수는 Table 1에 정리하였다.

실험부재 PC-1과 PC-4는 프리스트레스 감소가 휨강도 감소에 미치는 영향을 알아보기 위한 실험체로 초기 프리스트레스 도입량을 각각 PS강연선 인장강도의 5%와 70%로 설계하였다. 실험부재에 초기 도입된 프리스트레스의 크기는 PC-4의 경우 목표치의

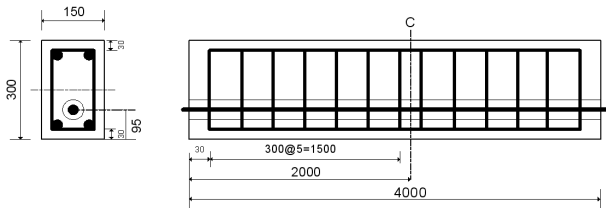


Fig. 1. Details of 4m PSC beam (Unit : mm)

78% 수준(인장강도의 $0.7f_{pu} = 100\%$ 기준)이었으며, 실험부재의 길이가 4m로 매우 짧아 PS 강연선 긴장후 정착시 슬립에 의한 영향으로 초기 목표치에 도달시킬 수 없었다. Table 1에 나타난 초기 프리스트레스 수치는 긴장 정착 후 PS강연선에 부착시킨 변형률계이지의 변형을 변화량을 토대로 산출한 결과이다.

실험부재 C-1, PC-2 그리고 PC-3는 PS강재의 단면적 감소가 PSC보의 휨강도 감소에 미치는 영향을 알아보기 위한 실험체들이다. 실험체 C-1의 경우 PS강재가 전부 부식되었다고 가정하여 철근콘크리트 부재로 설계하였다. 실험체 PC-2와 PC-3는 부식에 의해 PS 강재의 단면적이 감소된 상황을 모사하기 위해 실험부재 중앙부 PS강연선을 지름 25mm 드릴을 이용해 외부로 노출시킨 후 부식촉진장치를 이용해 인위적으로 부식시켰다(Youn et al. 2006). 부식 촉진시 9V 전위치를 도입하였으며, PC-2 부재의 경우 2주간, PC-3 부재의 경우 3주간 부식시켰다. 실험체 PC-2와 PC-3에 대한 부식촉진 실험후 부식 부산물을 깨끗이 청소한 후 PS 강연선의 부식 정도를 육안 관찰하였다. Fig. 2(b)와 Fig. 3(b)에 부식된 PS강연선의 상태를 나타내었다. 육안 관찰결과 실험체 PC-2의 경우 강선의 파단은 발생하지 않아 약 10% 정도 PS 강재의 단면적이 감소된 것으로 가정하였다. PC-3 실험체는 PS 강선 2가닥이 파단되어 약 30% 정도 PS강재의 단면적 감소가 발생되었다고 가정하였다.

실제 육안관찰은 25mm 드릴링 구멍을 통해 내시경을 이용해

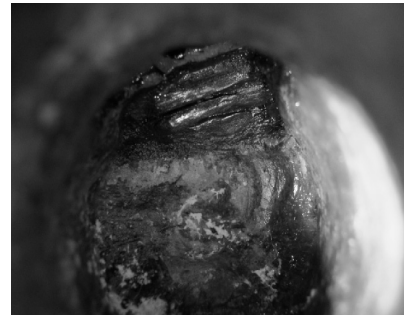
Table 1. Test beams and test parameters

Test beam	Test parameter	Initial Prestress (0.7fpu=100%) (%*)	Loss of PS strand area (%)	Remarks
PC-1	Loss of prestress	5	0	-
PC-4		78	0	-
C-1	Loss of PS strand area	0	100	no grouting
PC-2		60	10	2 weeks corroded
PC-3		76	30	3 weeks corroded

* : The 70% of tensile strength of the PS strand is assumed as the 100% of initial prestress.



(a) After drilling



(b) After accelerated corrosion test

Fig. 2. Close views of the corroding site of PC-2

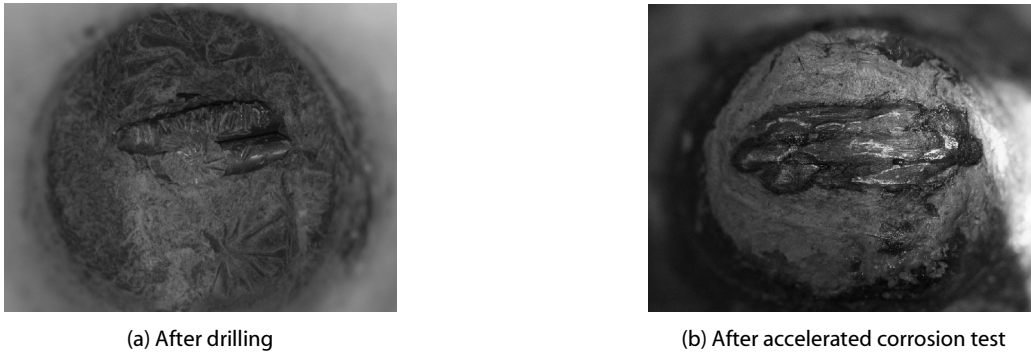


Fig. 3. Close views of the corroding site of PC-2

Table 2. Material properties

Material	Material properties
Concrete	28 days compressive strength $f_{ck} = 31\text{MPa}$
Reinforcing bars	D13, Yield strength $f_y = 400\text{MPa}$
PS strand	SWPC 7B, Diameter = 12.7mm Tensile strength; $P_u = 187\text{kN}$, Yield strength; $P_y = 159\text{kN}$

일방향으로 수행하였는데, PS강연선의 단면적 감소량을 정확히 산정하는데 많은 한계가 있었다. 보다 정확한 산정은 PS강연선을 감싸고 콘크리트 제거한 후 육안관찰을 통하여 가능할 것이라 판단 된다. 휨강도 실험결과와의 비교를 위한 해석치 산정에 사용된 실험 부재의 콘크리트, 철근 그리고 PS 강연선의 재료 특성은 Table 2에 수록하였다.

3.2 실험방법

3.2.1 측정방법

정적하중을 재하하면서 실험체가 파괴에 도달할 때까지 실험체 중앙부 상면과 하면의 콘크리트 변형을 변화, 인장철근과 압축철근의 변형을 변화, 그리고 처짐 변화량을 측정하였다. 재하하중의 크기는 하중재하장치 자체의 하중 계기판과 실험부재 상단에 설치한 로드셀을 이용하여 측정하였다. 또한 실험체 하면에 초기 균열이 발생되면 하중을 제거한 이후 균열계이치를 부착하는 방법으로 균열폭 변화량을 측정하였으며, 균열 진전은 육안으로 관찰하였다. PS 강연선을 부식시킨 실험체 PC-3의 경우에는 2개의 음향센서를 실험체 중앙에서 1m 이격된 위치에 부착하여 극한하중에 도달 이전에 예상되는 PS 강선의 조기 파단 여부를 모니터링하였다 (Youn et al. 2005; Youn et al. 2006).

3.2.2 하중 재하 방법

길이가 4m인 PSC보 실험 부재를 단순 지지시킨 후 중앙부

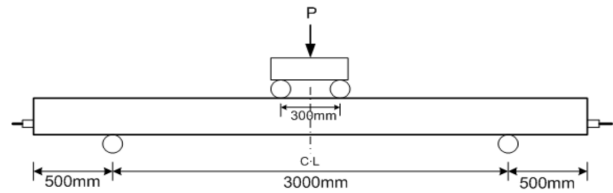


Fig. 4. Static loading method

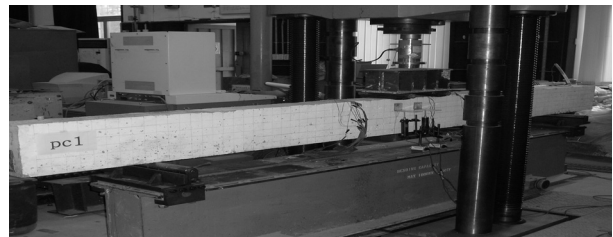


Fig. 5. View of static loading test

2곳에 정적하중을 처짐조절방식으로 재하하였다. Fig. 4에 나타난 바와 같이 실험부재의 길이는 3m이며, 부재 중앙부 콘크리트 상면의 변형을 변화량을 측정하기 위해 하중 재하위치를 300mm 이격시켰다. 정적하중은 실험부재의 균열하중과 예상파괴하중의 약 70% 정도에서 반복하중을 2회 재하하였으며 이후 파괴시까지 하중을 단조증가시켰다. Fig. 5에 4m PSC보부재에 대한 실험전경을 나타내었다.

3.3 실험 결과 분석

3.3.1 하중-처짐 곡선

실험부재에 대한 정적하중 재하실험 결과 모든 부재는 재하하중의 크기가 증가하면서 균열이 발생한 후 선형적인 거동에서 비선형 거동을 보이며 처짐이 증가하다가 실험체 중앙부 상면의 콘크리트가 압축파쇄 현상을 보이며 휨파괴되었다. Fig. 6에는 실험부재 C-1, PC-1, 그리고 PC-4의 중앙부 하중-처짐 곡선을 나타내었다.

Fig. 6에 나타난 바와 같이 실험부재 C-1, PC-1, 그리고 PC-4의

경우 재하하중이 증가되면서 초기 선형적인 거동하다가 균열발생이후 비선형거동을 보이는 전형적인 연성 거동을 하고 있음을 알 수 있다. 프리스트레스 도입량이 작은 PC-1 실험체는 실험 전 예상한 바와 같이 PC-4에 비해 균열하중과 극한하중의 크기가 작았다. 또한 반복하중 재하에 따른 PC-1 실험체의 잔류처짐량도 PC-4

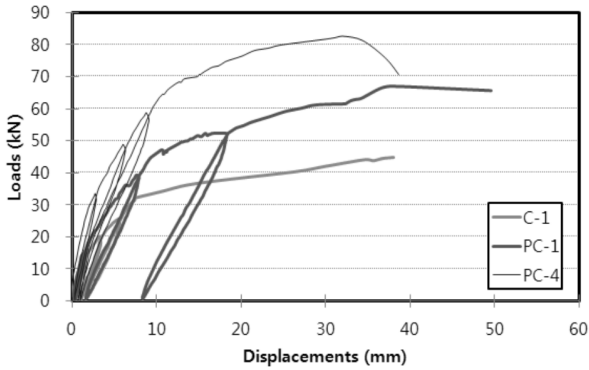


Fig. 6. Load and deflection curves of C-1, PC-1, and PC-4

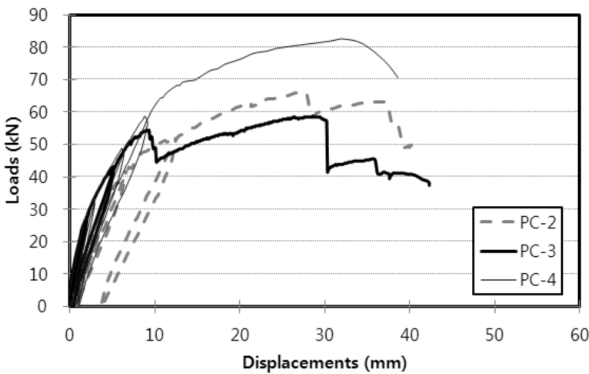


Fig. 7. Load and deflection curves of PC-2, PC-3, and PC-4

실험체보다 상대적으로 크게 발생하였다. 하지만 PC-4 극한하중의 1/2 수준인 40kN까지 정적하중을 재하한 후 하중을 제거했을 때 잔류처짐량의 크기는 1.5mm로 매우 작았다. PSC교량 공용시 사용 하중의 크기는 균열하중의 크기보다 작기 때문에, PC-4 실험체의 균열하중인 27kN 정도의 정적하중을 작용한 경우라면 잔류처짐량의 크기는 더욱 작을 것이라 예상할 수 있다. 따라서 실제 PSC거더교와 같이 여러 개의 PSC거더가 적용된 경우, 사용하중 작용시 PSC거더의 도입된 프리스트레스 크기를 처짐량과 잔류처짐량으로 예측하기는 매우 어렵다고 판단된다.

Fig. 7에는 실험부재 PC-2, PC-3 그리고 PC-4의 중앙부 하중-처짐 곡선을 나타내었다. PS강연선을 부식시킨 실험체 PC-2와 PC-3는 실험체 PC-4와 유사한 하중-처짐 관계를 보였지만 정적하중의 크기가 50kN을 넘어서면서 처짐량이 빠르게 증가하다가 PS강선이 조기 파단되며 극한강도에 도달하였다. 정적하중 재하실험을 처짐 조절방식으로 재하하였기 때문에 PS강선 파단과 함께 실험체의 하중 저항 능력이 감소되는 현상을 보였지만 급격한 취성파괴는 발생하지 않았다. 실험체 PC-2와 PC-3의 하중-처짐 곡선은 PS강선이 한가닥씩 파단되면서 철근콘크리트 실험체 C-1의 극한강도에 수렴해가는 양상을 보였다. 이상과 같이 부식된 PS강선이 있는 실험체 PC-2와 PC-3의 처짐량은 정적하중의 크기가 극한하중 수준에 도달하기 전까지 부식이 발생하지 않은 PC-4 실험체의 처짐량과 유사하기 때문에, 사용하중 수준의 하중이 작용하는 경우 하중-처짐 곡선을 토대로 실험체 내부의 PS강선의 부식 여부를 예측하기 힘들다고 판단된다.

각 실험부재의 파괴시 양상을 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8(b)에 나타난 PC-1 실험체의 경우 Fig. 6에 나타난 바와 같이 극한 하중을 넘어 부재가 완전히 파괴될 까지 처짐량을 증가시킨 경우로 취성파괴 양상을 보이지 않았다.

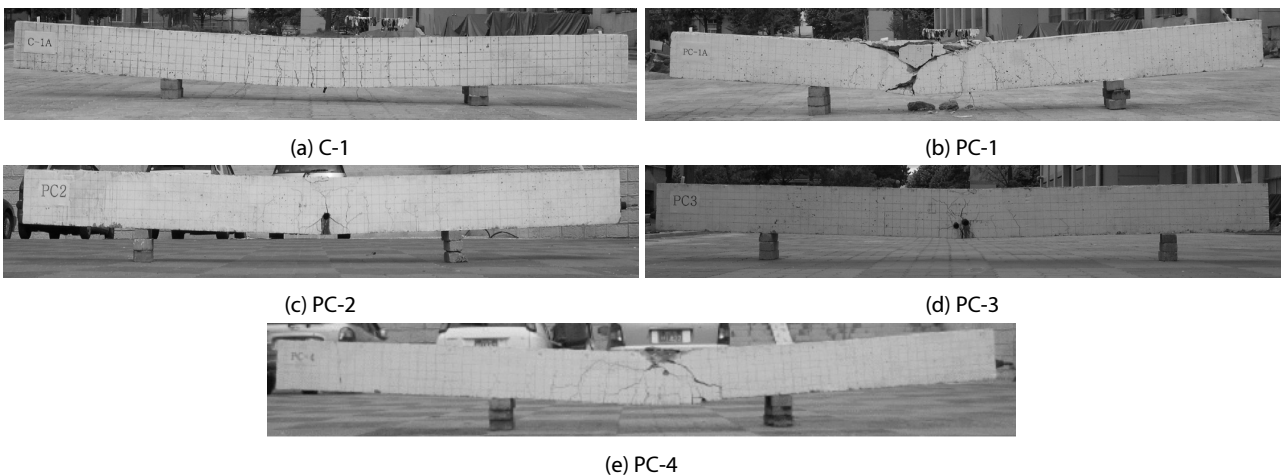


Fig. 8. Views of test beams after static loading tests

3.3.2 하중 상부 콘크리트변형률 곡선

Fig. 9에 파괴시까지 실험부재 중앙부 상면 압축을 받는 콘크리트 변형률 변화를 나타내었다. 모든 부재의 콘크리트 상면 압축변형률은 처짐 거동과 유사하게 정적하중이 증가함에 따라서 선형적으로 거동하다 균열발생 후 비선형적으로 증가되는 양상을 보였으며, 최종 휨파괴시 콘크리트의 압축변형률이 설계시 가정치인 콘크리트의 극한변형률 0.003mm/mm 을 초과하였다. 실험체 PC-3는 PS 강연선을 3주간 부식시킨 부재로 콘크리트 압축변형률이 약 0.0012

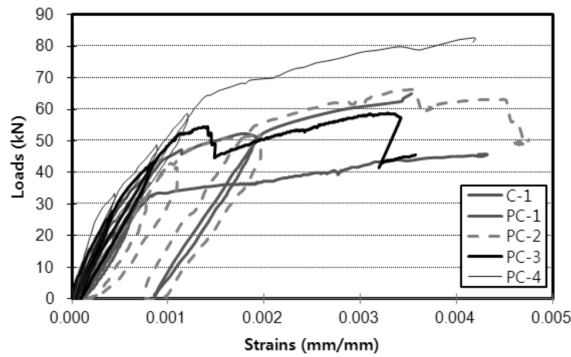


Fig. 9. Load and concrete compressive strain curves at the top surface of test beams

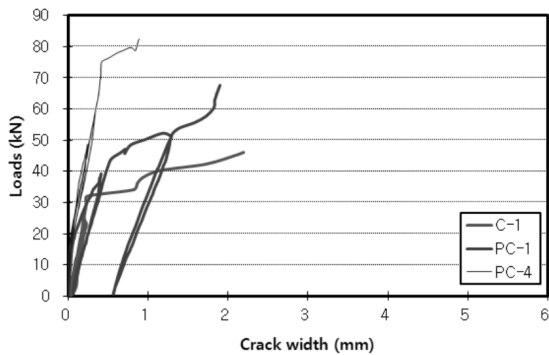


Fig. 10. Load and crack width curves of C-1, PC-1, and PC-4

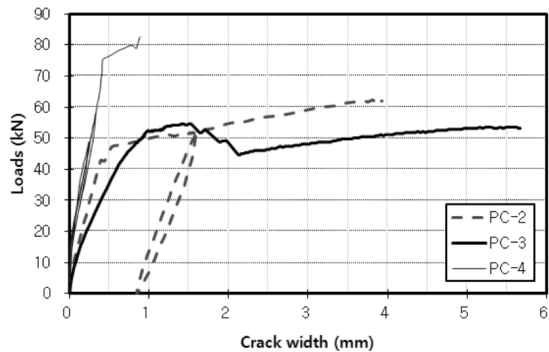


Fig. 11. Load and crack width curves of PC-2, PC-3, and PC-4

mm/mm 부근에서 PS강선들이 파단되며 압축변형률이 급격히 증가되는 현상을 보였지만, 파단되지 않은 PS강선의 영향으로 극한 강도 도달시 콘크리트 압축변형률이 0.003mm/mm 을 초과하였다. 이상과 같이 콘크리트 보부재 상면의 압축변형률 변화량을 토대로 사용하중 작용시 실험체 PC-1의 프리스트레스 손실 여부, 실험체 PC-2와 PC-3의 PS강연선 부식 여부를 판단하기 어렵다는 것을 재확인할 수 있었다.

3.3.3 균열과 균열폭

파괴시까지 정적 재하하중의 크기를 증가시키면서 실험체에 발생된 초기 균열하중의 크기와 균열진전상황을 조사하였다(Fig. 8 참조). 초기 균열하중의 크기를 Table 3에 나타내었는데, 프리스트레스 영향이 작은 PC-1 실험체의 균열하중 크기는 C-1 실험체 수준이었으며, 프리스트레스의 크기가 제일 큰 실험체 PC-4의 균열하중 크기가 가장 크게 평가되었다. PS강연선을 3주간 부식시킨 실험체 PC-3의 균열하중의 크기는 초기 예상과 달리 25kN 수준으로 PC-4 실험체의 균열하중 27.9kN 보다 10% 정도만 작게 평가되었다. 모든 부재에 발생된 균열들의 균열간격은 Fig. 8에 나타난 바와 같이 유사한 양상을 보였는데, 이는 모든 부재에 배근한 인장철근의 개수와 철근 지름이 13mm 로 동일하기 때문이라고 판단된다.

균열폭 변화량을 비교 분석하기 위하여 Fig. 10에는 실험부재 C-1, PC-1 그리고 PC-4의 하중-균열폭 곡선을 나타내었다. 그림에서 프리스트레스 도입량의 크기가 작은 실험체 PC-1의 균열폭은 균열하중이 작기 때문에 재하하중의 크기가 증가함에 따른 균열폭 증가량이 PC-4보다 크게 평가되었지만, 두 실험체 모두 균열폭의 크기가 0.5mm 부근에 도달한 후 균열폭이 급격히 증가하는 비슷한 형태를 보였다. Fig. 11에는 실험체 PC-2, PC-3 그리고 PC-4의 하중-균열폭 곡선을 나타내었는데, PS강연선을 부식시킨 PC-2와 PC-3의 경우 재하하중의 크기가 50kN 부근에서 급격한 비선형 거동을 보이면서 균열폭이 크게 증가되는 현상을 보였다. 실제 실험시 두 실험체 PC-2와 PC-3는 PS강연선을 부식시킨 중앙부의 균열폭이 매우 커서 파괴하중 도달 이전에 균열폭 측정 센서를 실험부재에서 제거한 결과이다. 실험부재 PC-2와 PC-3의 경우 균열이 발생된 위치와 균열 간격 등이 다른 부재와 비슷하였지만 PS강선이 부식된 위치에서 부재의 휨강도가 다른 부위의 강도보다 매우 작아 외력에 대한 응력집중이 발생하여 균열폭이 급격하게 증가되는 것으로 판단되었다.

이상과 같이 균열폭에 대한 측정결과를 토대로 사용하중 작용시 프리스트레스 손실과 PS강연선의 부식상태 여부는 균열폭 변화량을 토대로 판단할 수 있다고 예상된다. 이 연구에서 사용된 실험체의 경우 PC-4의 최대 균열폭이 1mm 수준이고 또한 PC-2와 PC-3의 경우 균열폭 1mm 부근에서 균열폭이 급격히 증가하는 현상을

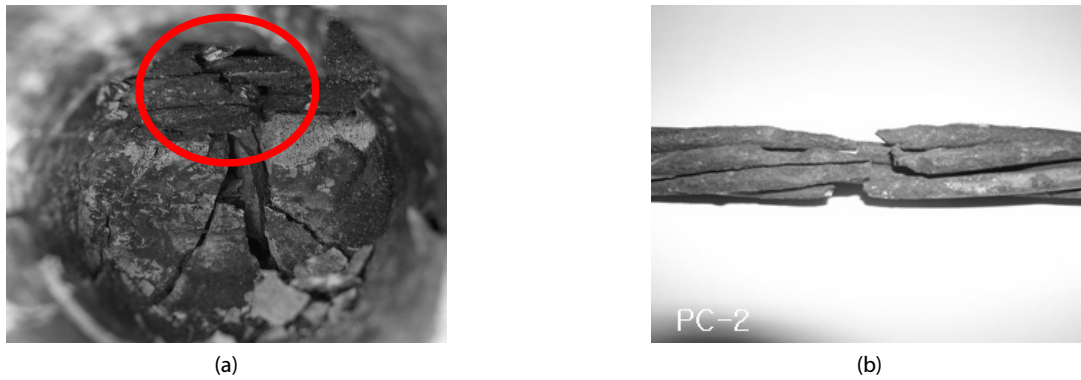


Fig. 12. Close view of disconnected PS strand of PC-2

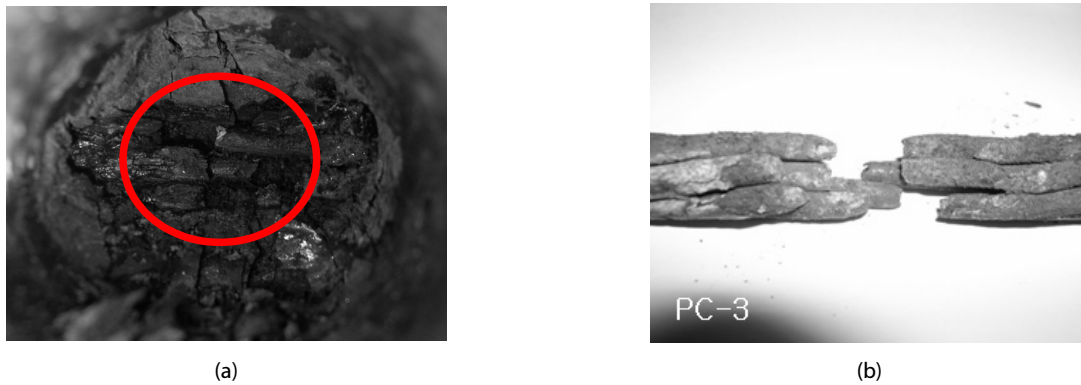


Fig. 13. Close view of disconnected PS strand of PC-3

보였다. 또한 PC-1 실험체의 경우에는 균열폭 0.5mm 수준에서 균열폭이 비선형적으로 증가되는 형태를 보였다. 따라서 정모멘트를 받는 PSC 보부재의 경우, 사용하중 작용시 균열이 발생한 후 균열폭이 0.5mm 수준에 도달한다면 부재의 안전성을 정밀하게 평가해볼 필요성이 있다고 판단된다.

3.3.4 부식시킨 실험부재 PC-2와 PC-3의 PS강선 파단

PS강선을 부식시킨 실험부재 PC-2와 PC-3에 대한 파괴실험시 부식된 PS강연선은 강선 한가닥 한가닥씩 파단되었으며, 파단시 매우 큰 에너지가 음파로 발산되는 것을 확인할 수 있었다. 터던 파단시 발생한 파단 음향을 음향센서뿐만 아니라 실제 실험을 진행 하던 연구원들이 명확하게 들을 수 있었다. Fig. 12와 Fig. 13에는 각각 실험체 PC-2와 PC-3에 대해 휨파괴 실험후 부식촉진실험을 위한 드릴링 구멍을 통해 관찰한 PS강연선 사진과 콘크리트 부재를 해체한 후 파단된 PS강연선 사진을 나타내었다. 실험체 PC-2의 경우 실제 부식된 단면적은 25% 수준이었으며, 7연선중에서 6연선이 최종 파단되고 강선 한가닥은 파단되지 않았다. 부식촉진장치를 이용해 3주간 부식시킨 실험체 PC-3는 부식된 단면적은 50% 수준이었으며, 7연선 모두 최종 파단되었다.

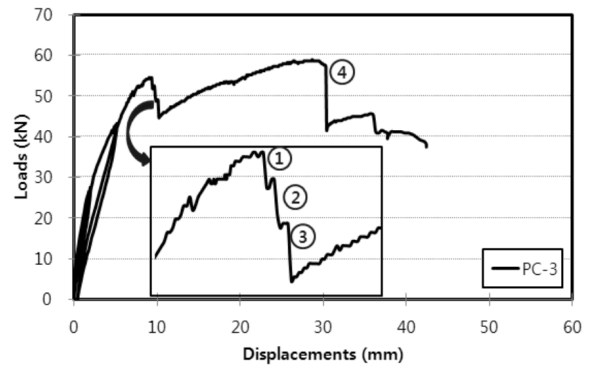


Fig. 14. Acoustic events developed during static loading test for PC-3

실험부재 PC-3의 경우 파괴실험 수행전에 실험부재 양 측면에 AE센서를 부착하여 PS강선 파단시 발생하는 음파를 감지하였다. Fig. 14에 실험부재 PC-3의 하중-처짐 곡선을 나타내었는데, 그림에서 재하하중의 크기가 약 54kN 부근에서 하중의 크기가 감소됨을 확인할 수 있으며, 하중이 감소된 후 다시 재하하중과 처짐이 증가하다가 59kN 부근에서 다시 재하하중의 크기가 급격히 감소되고 있음을 확인할 수 있다. 재하하중의 크기가 급격히 감소되는 지점은

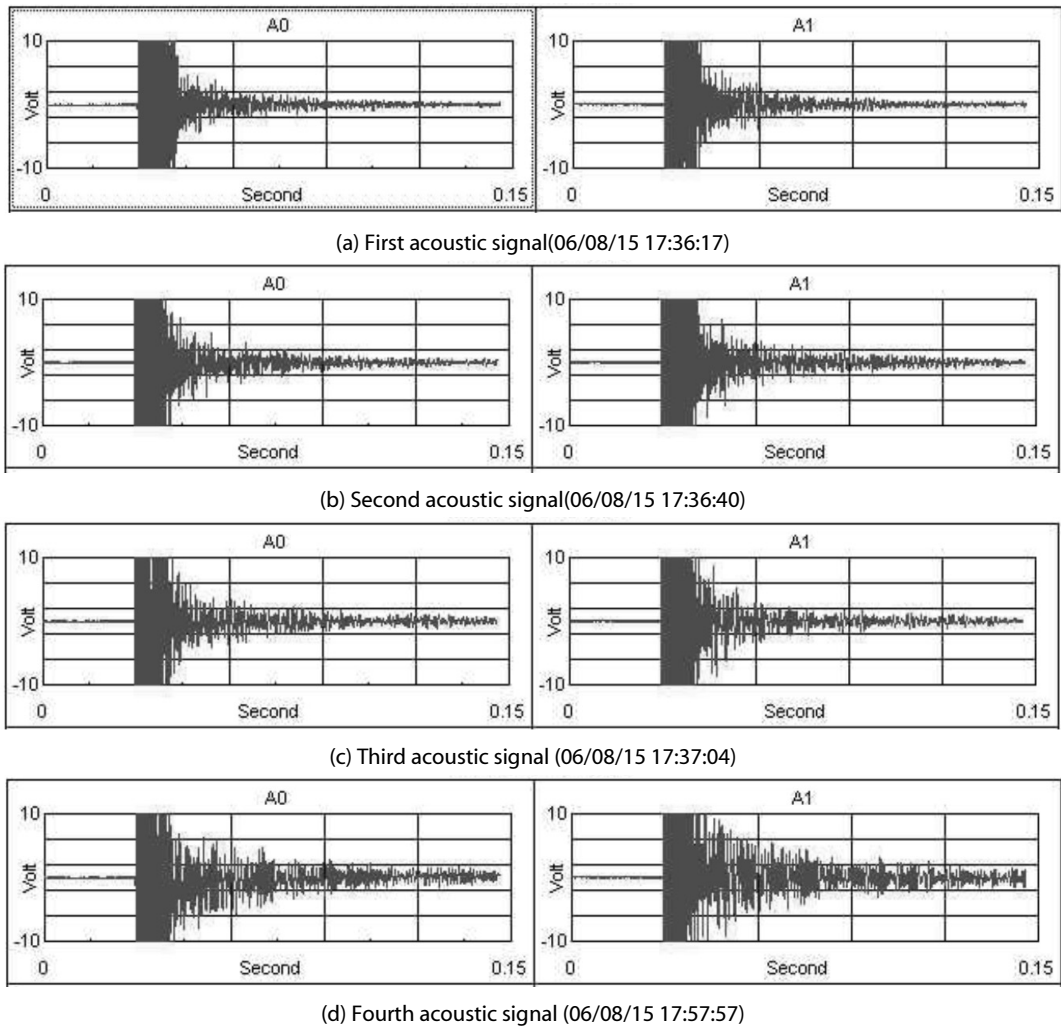


Fig. 15. Acoustic signals monitored during static loading test for PC-3

Table 3. Cracking loads and ultimate moment capacities

Test beam	Test parameter	Initial prestress (0.7fpu=100%) (%)	Loss of PS strand area (%)	Cracking load (kN)	Moment capacity (kN-m)		Failure mode
					Test	Calculated	
PC-1	Loss of prestress	5%	0	16.4	45.56	44.63	flexural
PC-4		78%	0	27.9	55.68	51.48	flexural
C-1	Loss of PS strand area	-	100	14.9	31.05	24.88	flexural
PC-2		60%	10	20.0	44.55	48.36 (43.75*)	flexural
PC-3		76%	30	25.0	39.76	46.30 (37.14**)	flexural

*; Calculated moment capacity based on the assumption of the loss of PS strand area is 30%

**; Calculated moment capacity based on the assumption of the loss of PS strand area is 60%

PS강선이 파단되는 시점을 나타내며, 재하하중의 크기가 처짐조절 방식으로 조절되고 있기 때문에 처짐은 증가되지 않고 하중의 크기만 급격히 감소되고 있다.

위의 Fig. 14에 나타낸 총 4회의 PS강선 파단시 발생된 음파의

파형을 Fig. 15에 나타내었다. 그림에서 확인할 수 있듯이 PSC보의 파괴실험시 부식된 PS강선의 파단시 발생하는 음파의 크기와 지속 시간은 매우 크다는 것을 확인할 수 있었다(Youn et al. 2005; Youn et al. 2006).

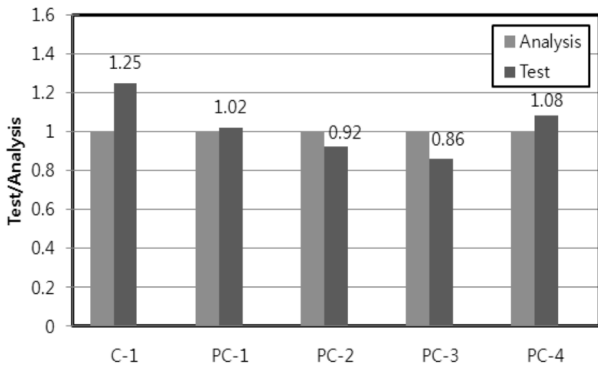


Fig. 16. Comparison of the test results and the calculated moment capacities

이상과 같은 실험결과를 토대로 PS강연선이 부식된 경우 최종 파괴에 이를때까지 PS강선이 한가닥씩 초기에 파단되기 때문에 PSC보부재의 휨강도를 단순히 잔존하고 있는 PS강선의 단면적을 토대로 산정하는 경우 PSC보부재의 휨강도를 과대평가할 위험성이 있다. 따라서 PS강선이 부식된 경우에는 PSC보부재의 휨강도 평가 시 안전성을 고려하여 일정 단면 이상 부식된 PS강선의 단면적은 고려하지 않는 것이 타당하다고 판단된다.

3.3.5 극한휨강도

파괴시 각 부재의 휨강도 실험치와 비교를 위한 해석치를 Table 3에 정리하였으며, Fig. 16에 휨강도 해석치에 대한 실험치의 비를 나타내었다. Table에 제시된 해석치는 PS강선의 응력-변형을 곡선을 토대로 변형률적합방법을 이용해 산정한 결과이다. 먼저 프리스트레스의 크기가 감소되면 휨강도가 감소되는 것을 실험부재 PC-1과 PC-4부재의 실험결과를 통해 확인할 수 있다. 또한 두 실험체의 휨강도는 해석치보다 큰 결과를 얻을 수 있었다. 하지만 PS강재가 부식된 실험부재 PC-2와 PC-3의 경우 휨강도 실험결과는 초기 일방향 육안조사 결과를 토대로 PS강재 단면적 감소량을 각각 10%와 30%로 가정한 해석치보다 각각 8%와 14%씩 작게 평가되었다. 실제 실험이 마친 실험체에서 분리된 PS강연선의 육안조사를 통해 부식에 의한 단면적 감소량은 PC-2는 약 25%, PC-3 실험체의 경우 50% 정도로 초기 가정치와 차이가 컸다. 이러한 실험결과와 해석결과와의 비교를 통해 먼저 지름이 25mm인 초기 드릴링 구멍을 이용한 일방향 육안조사로 PS강재의 단면적 감소량을 평가하는 것은 오차가 클 수 있으며, 또한 재하하중의 크기가 극한하중에 가까워지면서 부식 부위의 균열폭이 급격히 증가되어 부식된 PS강선이 한가닥씩 파단되는 현상으로 휨강도가 급격히 감소되는 현상을 휨강도 평가시 고려해야 한다고 판단된다.

4. PS강재가 부식된 PSC보의 휨강도 평가방법 고찰

PS강재가 부식된 PSC보부재의 휨강도 평가시 연성거동을 가정 한다면 먼저 식 4에 나타난 바와 같이 부식된 PS강재의 잔류단면적 A_{RP} 과 부식된 인장철근의 잔류단면적 A_{RS} 을 이용하여 휨강도 산정은 식 5를 이용해 산정할 수 있다.

$$M_n = A_{RP}f_{ps}\left(d_p - \frac{a}{2}\right) + A_{RS}f_y\left(d_s - \frac{a}{2}\right) \quad (5)$$

여기서, A_{RP} : PS강재의 잔류 단면적

A_{RS} : 인장철근의 잔류 단면적

그러나 인장철근과는 달리 PS강재는 조기 파단되는 특성이 있기 때문에 식 5에서 제시한 PS강재의 잔류 단면적을 휨강도 평가시 다 적용하면 휨강도를 과다 평가하는 결과를 초래할 수 있다. 따라서 PS강선의 단면적 감소가 심해 조기 파단될 가능성이 있다고 판단되는 부식된 PS강재의 단면적을 제외한 유효 단면적을 이용한 식 6을 이용해 휨강도 평가할 필요성이 있다.

$$M_n = A_{EP}f_{ps}\left(d_p - \frac{a}{2}\right) + A_{RS}f_y\left(d_s - \frac{a}{2}\right) \quad (6)$$

여기서, A_{EP} : PS강재의 유효단면적

PS강재가 부식된 PSC보부재의 실제 휨강도는 식 5보다는 작고 식 6보다는 커야 한다. 이 연구를 통해 부식된 PS강재의 유효단면적 A_{EP} 산정을 위한 구체적인 기술적 정보를 얻을 수는 없었다. 따라서, 보다 상세한 기술적 자료가 확보되기 전에는보다 보수적인 휨강도 평가를 위해 부식된 PS강선들을 전부 제외시키고 휨강도를 평가하는 것이 안전측이라 판단한다.

5. 결론 및 추후 연구내용

PS강재가 부식된 PSC보의 휨강도 평가방법을 개발하기 위해 수행한 실내실험 결과를 이 논문에 정리하였다. 길이가 4m인 PSC보의 덕트 내부에 있는 PS강연선을 노출시킨 상태에서 부식촉진장치를 이용해 인위적으로 PS강연선을 부식시켰으며, 실험부재의 파괴 시까지 정적하중을 재하하여 PSC보의 극한휨거동을 분석하였다. 실내실험 결과 분석을 통해 향후 PSC보의 휨강도 평가시 고려해야 될 사항들에 대해 다음과 같은 결론을 도출하였으며 또한 향후 필요한 연구내용을 간략히 정리하였다.

- (1) 지름이 25mm로 드릴링한 좁은 구멍을 통하여 내시경을 이용한 일방향 육안조사만을 통해 부식된 PS강재의 단면적 감소량을 평가하는 방법은 실제 부식된 PS강재 단면적 산정시 오차가 크게 발생할 수 있다. 따라서 육안조사시 오차를 감소시키기 위해서는 부식된 PS강재의 노출면적을 증가시킨 후 육안관찰을 해야 오차를 감소시킬 수 있을 것이라 판단된다.
- (2) 프리스트레스가 크게 감소된 PSC보부재의 휨강도는 프리스트레스 감소를 고려한 변형률 적합조건을 이용해서 구한 휨강도 해석치와 유사한 결과를 얻었다. 하지만, 정적 재하하중의 크기가 사용하중 수준인 경우, 처짐량과 압축변형률 변화량을 이용하여 프리스트레스 감소를 예측하기 어려우며, 초기 균열하중의 크기와 균열폭 변화량을 이용하여 프리스트레스 감소를 예상할 수 있다고 판단된다.
- (3) PS강재가 부식된 PSC보부재의 경우 정적 재하하중의 크기가 사용하중 수준일 때 처짐량과 압축변형률 변화량의 크기가 PS강재가 부식되지 않은 PSC보부재와 유사한 특성을 보였다. 따라서 사용하중 수준에서 처짐량과 압축변형률 변화량을 통하여 PS강재의 부식 여부를 예측하는 것은 매우 힘들다고 판단된다.
- (4) PS강재가 부식된 PSC보부재의 경우 균열발생 이후 PS강재가 부식된 위치의 균열폭이 급격히 증가되는 특성을 보였다. 이 연구에 이용한 실험체의 경우 균열폭이 0.5mm 부근에서 비선형적으로 균열폭이 증가하기 시작하였으며, 1mm 정도되었을 때 극한하중에 도달하는 특성을 보였다. 따라서 PSC보부재의 유지관리시 0.5mm 수준 이상의 균열폭이 발견되면 안전성 확보를 위해 정밀한 유지관리가 필요하다고 판단된다.
- (5) 처짐조절방식으로 정적하중을 재하하였기 때문에 압축을 받는 콘크리트의 파괴시 변형률이 설계시 적용하고 있는 콘크리트의 극한변형률 0.003mm/mm을 모두 초과한 상태에서 연성과파괴되었다. 하지만 실제 PSC 구조물에 재하되는 하중은 하중조절방식에 가깝기 때문에 실험결과에서 보이듯이 일부 PS강선이 조기 파단되는 시기에 콘크리트의 극한변형률 0.003mm/mm에 도달하지 못하고 급격히 취성과파괴될 가능성이 매우 높다고 판단된다.
- (6) 부식된 PS강재는 PSC보가 극한휨강도에 도달되기 이전에 조기에 파단되는 현상을 보이며, 이로 인해 인장력을 받는 PS강재의 단면적이 감소되어 결국 PSC보의 휨강도가 감소된다. 따라서 PSC보의 휨강도 평가시 부식에 의해 단면적이 감소된 PS 강선을 인장력을 받는 유효한 강재 단면적으로 포함시키는 경우 PSC보의 극한휨강도가 과대평가될 위험성이 있다. 반대로 부식된 PS 강선의 단면적을 모두 배제시키는 경우 실험결과를 통해 PSC보의 극한휨강도가 과소평가됨을 확인할 수 있었다. 결론적으로 PS 강선이 부식된 PSC보의 극한 휨강도는 두 가지

극단적인 경우 얻어지는 휨강도 수치들의 사이에 존재한다고 판단된다.

이상과 같이 실내실험을 통해 얻은 결과물들은 향후 PS강재가 부식된 PSC보의 휨강도 평가시 기술적인 자료로 활용할 수 있을 것이다. 하지만 앞서 언급한 바와 같이 PS강선의 부식정도에 따른 유효단면적을 산정하는 방법을 위한 정량적인 수치또는 기준안을 제공하지는 못하였다. 따라서 향후 PSC보의 휨강도 평가시 부식된 PS 강선의 유효단면적 산정을 위한 추가적인 연구가 필요하다고 판단된다.

감사의 글

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 일부 지원으로 수행되었습니다.

References

- AASHTO (2003). *Manual for condition evaluation and load and resistance factor rating (LRFR) of highway bridges*, AASHTO, Washington, D.C., U.S.A.
- Fricker, S., and Vogel, T. (2006). "Site installation and testing of a continuous acoustic monitoring." *Construction and Building Materials*, 21, pp. 501-510.
- Halsall, A. P. Welch, W. E., and Trepanier, S. M. (1996). "Acoustic monitoring technology for post-tensioned concrete structures." *Proceeding of the FIP Symposium 1996 on Post-tensioned Concrete Structures*, The Concrete Society, pp. 483-491.
- Kim, Y. T., Youn, S. G., and Kim, E. K. (2007). "Experimental test for measuring prestress in PSC beam using flat-jack," *Proceedings of the Annual Conference of Korea Concrete Institute, KCI*, Vol. 19, No. 1, pp. 501-504 (in Korean).
- Mathy, B. Demars, P. Roisin, F., and Wouters, M. (1996). "Investigation and strengthening study of twenty damaged bridges: A Belgium Case History." *Bridge Management : Inspection, Maintenance and Repair, Proceedings of the 3rd International Conference.*, Transportation Research Board, University of Surrey, pp. 658-666.
- National Standard of Canada (2000). *Canadian highway bridge design code*, CSA International, CAN/CSA-S6-00, Ontario, Canada.
- Park, S. H., Youn, S. G., and Kim, E. K. (2008). "Ultimate flexural behavior of PSC beams with corroded tendons." *Proceedings of the Annual Conference of Korean Society of Civil Engineers, KSCE*, pp. 2308-2311 (in Korean).
- The Concrete Society (1996). *Durable bonded post-tensioned concrete bridges*, Concrete Society Technical Report 47, TR047, England.
- Woodward, R. J., and Williams, F. W. (1988). "Collapse of ynys-gwas bridge." *Proceedings of the Institute of Civil Engineers*,

- West Glamorgan, Part 1, Vol. 84, pp. 635-669.
- Youn, S. G. (2000). "Development of corrosion monitoring techniques for reinforcements and prestressing tendons." *Proceedings of the Annual Conference of Korea Concrete Institute, KCI*, Vol. 12, No. 2, pp. 1297-1302 (in Korean).
- Youn, S. G., Cho, S. K., and Kim, E. K. (2005). "Acoustic emission technique for detection of corrosion-induced wire fracture." *Key Engineering Materials*, Vols. 297-300, pp. 2040-2045.
- Youn, S. G., Kim, E. K., Choi, M., and Kim, H. (2005). "Analysis of acoustic signals of tendon fractures." *Proceedings of the Annual Conference of Korea Concrete Institute, KCI*, Vol. 17, No. 2, pp. 243-246 (in Korean).
- Youn, S. G., Lee, C., and Kim, E. K. (2006). "Estimation of velocities of acoustic signals and source locations in PSC beam by acoustic emission." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers, KSCE*, Vol. 26, No. 5A, pp. 917-925 (in Korean).