

PSC I 거더의 정착부 파열거동 평가

Evaluation of Bursting Behavior in Anchorage Zone of PSC I Girders

최규천* · 박영하** · 백인열***

Choi, Kyu Chon · Park, Young Ha · Paik, In Yeol

Abstract

An experimental study to evaluate bursting behavior in anchorage zone of the standard PSC I girders (span length : 30 m) has been carried out. The arrangement of bursting reinforcement in anchorage zone of the standard PSC I girders is considered to be designed without accurately reflecting the stress flows in the end zone of the PSC I girders caused by prestressing forces of the tendons. Also, due to excessive arrangement of the bursting bars, the workability of the girder is decreased greatly. In this study, three specimens with the same dimensions as the end zone of the standard PSC I girder are prepared and the experiment is carried out by applying PS forces. The bursting reinforcement of each specimen consists of 100 mm, 200 mm, and 300mm spacings, respectively. The experimental results show that the range of the PS forces to cause crack in the anchorage zone of the specimen are more than 1.6 times of the design PS forces. The bursting cracks occur in the vertical direction on the inside of all specimens. After applying 2.7 times of the design PS force, some of the transverse bursting reinforcements only in the specimen reinforced by 300 mm spacing yielded. The experimental results show that the anchorage zone of the standard PSC I girders arranged by 300 mm spacing of the bursting reinforcements which is the maximum spacing allowed in the road bridge design specifications, can be considered safe enough.

Keywords : anchorage zone, bursting force, bursting reinforcement, bursting crack, spalling force, spalling reinforcement, spalling crack, PSC I girder

요 지

이 논문에서는 경간장이 30 m인 표준 PSC I 거더의 정착부 거동을 평가하기 위한 실험적 연구를 수행하였다. 현재 사용되고 있는 표준 PSC I 거더의 정착부 파열보강철근은 텐던 긴장으로 인한 단부 콘크리트의 응력흐름을 정확히 반영하지 못한 채 설계되었고, 과대보강으로 인해 콘크리트 타설 시 작업성이 크게 떨어지고 있는 실정이다. 따라서 이 논문에서는 표준 PSC I 거더와 동일한 단면을 갖는 실험체 3개를 제작하여 인장실험을 수행하였다. 각 실험체의 파열보강철근은 100 mm, 200 mm, 300 mm 간격의 격자형으로 배근되었다. 실험결과, 파열균열 긴장력은 모든 실험체에서 설계 긴장력의 1.6 배 내외로 나타났고, 파열균열은 정착단부 내부에서 수직방향으로 발생하였다. 또한 설계 긴장력의 2.7배까지 긴장력을 도입한 결과, 파열보강철근 간격이 300 mm인 실험체의 일부 수평방향 파열보강철근만 항복되었다. 따라서 표준 PSC I 거더의 정착부 파열보강철근은 도로교설계기준에서 제한하고 있는 최대 간격 300 mm를 만족시키는 것만으로도 파열력에 대한 안전성을 충분히 확보할 수 있음을 확인하였다.

핵심용어 : 정착부, 파열력, 파열보강철근, 파열균열, 할렬력, 할렬보강철근, 할렬균열, PSC I 거더

1. 서 론

긴장작업 시에 포스트텐션 PSC I 거더에 정착부의 표면 및 내부에 균열을 유발할 수 있는 응력으로는 할렬응력(spalling stress)과 파열응력(bursting stress)을 들 수 있다. 특히, 포스트텐션 PSC I 거더의 파열응력은 정착단부 내부에서 가장 크게 발생하고, 파열균열 역시 내부에서 발생하기 때문에 육안으로 확인하기 어렵다. 일반적으로 포스트텐션

PSC I 거더는 정착장치 간의 중심거리가 단부 폭보다 작기 때문에 파열균열은 내부에서 수직방향으로 발생하고, PSC 박스 거더의 웹(web)과 같이 정착장치 간의 중심거리가 단부 폭보다 큰 경우에는 수평방향으로 파열균열이 발생하기 때문에 정착단부 설계시 단부에서의 응력 메커니즘을 충분히 이해하고 설계를 수행해야 한다. 그러나 현행 표준 PSC I 거더의 구조계산서와 콘크리트 부재의 스트럿-타이 모델 예제집(한국콘크리트학회, 2006)에서는 표준 PSC I 거더의

*정회원 · 교신저자 · 한국도로공사 도로교통연구원 연구원 · 공학박사 (E-mail : ckc0511@cbnu.ac.kr)

**한국도로공사 도로교통연구원 수석연구원 · 공학박사 (E-mail : younghp@ex.co.kr)

***정회원 · 강원대학교 토목환경공학과 부교수 · 공학박사 (E-mail : pinyeol@kyungwon.ac.kr)

정착단부 파열보강철근을 상대적으로 응력이 작게 발생하는 수직방향 파열보강철근에 대해서만 근사해법 및 스트럿-타이 모델을 이용하여 파열보강철근량 및 배근 간격을 산정하고, 실제로 응력이 크게 발생하는 수평방향에 대해서는 파열응력이 작게 발생한다고 가정하여 수직방향 파열보강철근과 동일한 간격으로 배근하고 있는 실정이다.

기존에 수행된 포스트텐션 부재의 정착단부 거동에 관한 연구에 대해 살펴보면 다음과 같다.

Bain 등(1957)은 보강철근의 양, 정착판의 크기 및 콘크리트 강도를 실험변수로 하여 실험적 연구를 수행하여 파열보강철근을 적절히 배근할 경우 파열균열하중 및 극한하중이 증가하고, 정착판이 클수록 극한하중이 증가함을 규명하였다. Zielinski 등(1960)은 정착부의 단면적과 재하면의 면적비(A_b/A_a), 덕트의 크기, 정착장치의 위치(외부 또는 묻힘), 지압판의 형상, 보강재의 위치와 형식 및 양 등의 다양한 실험변수를 적용한 실험적 연구를 수행하여 정착부의 단면적과 재하면의 면적비는 파열응력의 분포와 극한하중에 영향을 미치나 최대 파열응력의 위치에는 영향을 미치지 않음을 규명하였다. Breen 등(1975)은 정착구의 형상, 콘크리트 강도, 단부 보강철근의 형상, 나선철근의 길이, 수평방향 긴장, 텐던의 곡률, 복부보강철근의 양에 따른 정착부의 거동을 규명하기 위한 실험적 연구를 수행하여 텐던 축을 따른 균열은 cone 형상의 정착부와 텐던의 곡률로 인한 방사력에 의해 가속되고, 균열하중은 철근비보다는 콘크리트의 강도에 영향을 크게 받음을 규명하였다. 오병환 등(1994)은 복수 정착구가 설치된 박스 거더의 정착단부 파열거동을 규명하기 위해 단일 텐던과 복수 텐던이 설치된 실물 크기의 박스 거더 실험체를 제작하여 인장실험을 수행한 결과, 파열균열은 정착판의 폭만큼 떨어진 위치에서 최초로 발생하고, 파열 변형률은 복수 텐던 실험체보다는 단일 텐던 실험체에서 크게 발생함을 규명하였다.

이상의 연구들은 축소된 실험체나 PSC 박스 거더를 대상으로 정착부의 거동을 규명하기 위한 실험적 연구를 수행하였을 뿐 실물 모형의 포스트텐션 PSC I 거더의 정착단부 거동을 규명하기 위한 실험적 연구는 거의 수행되지 않았다. 따라서 이 논문에서는 표준 PSC I 거더의 정착단부 파열보강철근 배근상세를 개선하기 위한 기초 연구로서 표준 PSC I 거더의 정착단부와 동일한 단면형상을 갖는 세 개의 실험체(파열보강철근 간격 : 100 mm, 200 mm, 300 mm)를 제작하여 긴장작업 시 발생하는 파열 변형률을 계측하고, 계측 데이터를 분석하여 정착단부에서의 파열거동을 규명하고자 한다.

2. 정착부 응력분포

2.1 압축응력

포스트텐션 PSC I 거더의 정착단부는 정착장치에 집중된 프리스트레스 힘이 콘크리트 단부에 전달되기 때문에 정착구역 내에서 응력교란으로 인해 응력이 선형적으로 분포하지 않는다. 즉, 정착구역 내의 응력은 그림 1과 같이 St. Venant의 원리에 기초로 하여 단부 높이 h 까지는 응력이 교란되고, h 이후부터는 단면 내에서 압축응력이 균일하게 분포하게 된다.

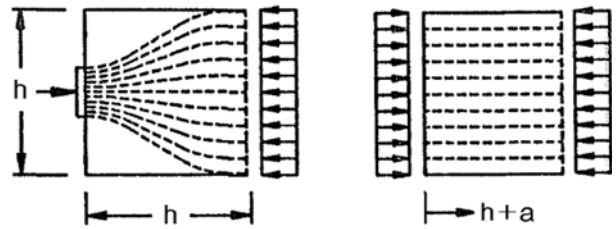


그림 1. 정착부에서의 압축응력 분포

2.2 파열응력

포스트텐션 PSC I 거더의 단부에 발생하는 수평방향 응력은 그림 2와 같이 정착장치 앞에서 높은 압축응력이 발생하나 정착장치에서 멀어질수록 압축응력이 점차적으로 감소하여 최대 인장응력이 발생하고, 이후부터는 점차적으로 인장응력이 감소하게 된다. 정착장치에 접한 콘크리트 블록이 구형인 경우, 콘크리트 블록에 발생하는 수평방향과 수직방향 파열응력의 크기는 콘크리트 블록의 높이(h)와 폭(b)의 크기에 따라 다르게 발생하기 때문에 파열균열의 방향 역시 콘크리트 블록의 높이와 폭의 크기에 따라 다르게 발생된다. 즉, PSC 박스 거더와 같이 정착장치의 중심간 거리가 웹의 폭보다 큰 경우에는 정착장치 하나에 저항하는 콘크리트 블록의 높이가 폭보다 크게 되기 때문에 파열응력은 수평방향보다는 수직방향을 크게 발생하고, 파열균열은 그림 3(a)와 같이 수평방향으로 발생하게 된다. 반면, 표준 PSC I 거더와 같이 단부 폭이 정착장치 중심간 거리보다 넓은 경우 정착장치 하나에 저항하는 콘크리트 블록의 높이가 폭보다 작게 되어 파열 변형이 수평방향으로 크게 발생하게 되고, 이로 인해 파열응력은 그림 2와 같이 수직방향보다 수평방향으로 크게 발생한다. 또한 다중 정착장치를 사용할 경우 각 정착장치에 도입된 긴장력에 의해 발생하는 수평방향 파열응력이 정착장치 사이에 있는 콘크리트에 중첩되기 때문에 파열균열은 그림 3(b)와 같이 부재 내부에서 수직방향으로 발생하게 된다.

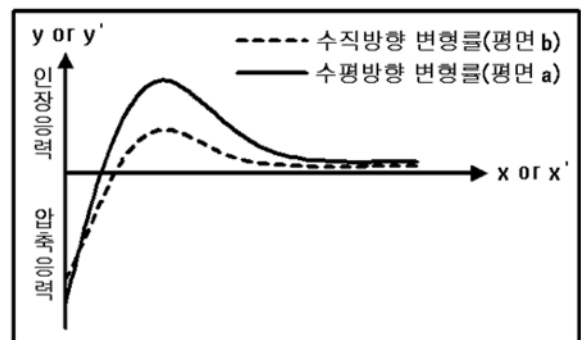
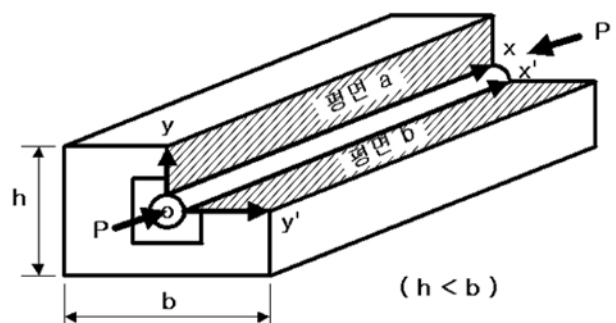


그림 2. 정착부 파열응력 분포

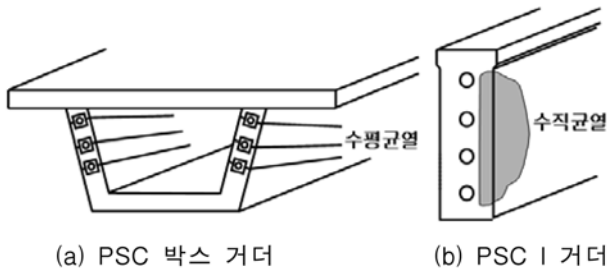


그림 3. 거더 형식에 따른 파열균열 양상

2.3. 할렬응력 및 지압응력

콘크리트 부재에 긴장력이 도입되면, 수평방향 단부 표면에 평행하게 인장응력이 발생한다. 이와 같이 단부 표면에 발생하는 인장응력을 할렬응력이라고 한다. 할렬응력은 파열응력에 비해 상대적으로 작게 발생하고, 국부적으로 발생하는 특징이 있다. 도로교설계기준(2005)에서 최소 할렬보강철근량은 총 포스트텐션 힘의 2.0%를 할렬력으로 하여 구하도록 하고 있다.

지압응력은 정착장치 앞 콘크리트에서 발생하는 압축응력으로서 정착장치 앞에서 가장 크게 발생한다. 도로교설계기준(2005)에서는 정착부 설계 시 콘크리트의 유효지압강도와 긴장 시 정착장치의 재료상태를 검토하도록 제한함으로써 콘크리트와 정착장치가 설계 긴장력에 안전하게 저항할 수 있도록 하고 있다.

3. 실험체 제작 및 게이지 설치

3.1 실험체 제작

실험체는 그림 4와 같이 30 m 표준 PSC I 거더(이하 표

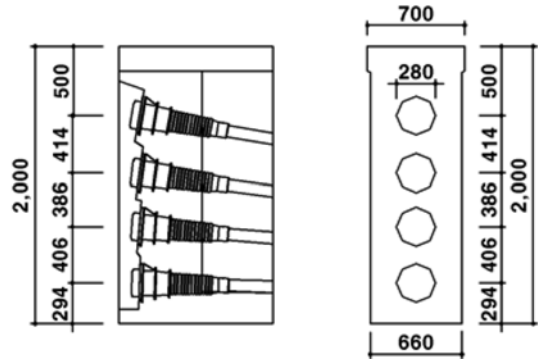


그림 4. 실험체 단부형상(단위 : mm)

준 PSC I 거더)와 동일한 단부형상을 갖도록 제작하였다. 즉, 모든 실험체는 그림 5(a), (b), (c)와 같이 좌측 단부로부터 3.5 m까지는 표준 PSC I 거더와 동일한 단부형상과 텐던 프로파일(profile)을 갖도록 제작하였다. 좌측 단부는 긴장력 도입 시 파열균열을 유도하기 위한 단면으로서 파열보강철근은 표 1과 같이 수평방향과 수직방향으로 등간격을 갖도록 배근하였고, 우측 단부의 파열보강철근은 그림 5(d)와 같이 100 mm 간격의 격자형으로 촘촘히 배근하여 긴장력 도입 시 파열균열이 발생하지 않도록 하였다. 표준 PSC I 거더는 정착구당 $\phi 12.7$ mm 강연선 12가닥이 사용되나 파열균열 발생 이후의 거동을 평가하기 위해 실험체는 정착구당 15.2 mm 강연선 19가닥을 사용하여 설계 긴장력의 2.7 배(강연선 항복하중의 90%)까지 긴장할 수 있도록 하였고, 정착구도 기존에 사용되던 $\phi 220$ mm보다 직경이 큰 $\phi 280$ mm를 사용하였다. 실험체는 콘크리트 타설 후 증기양생을 하였으며, 실험체의 압축강도를 평가하기 위해 총 9개의 공

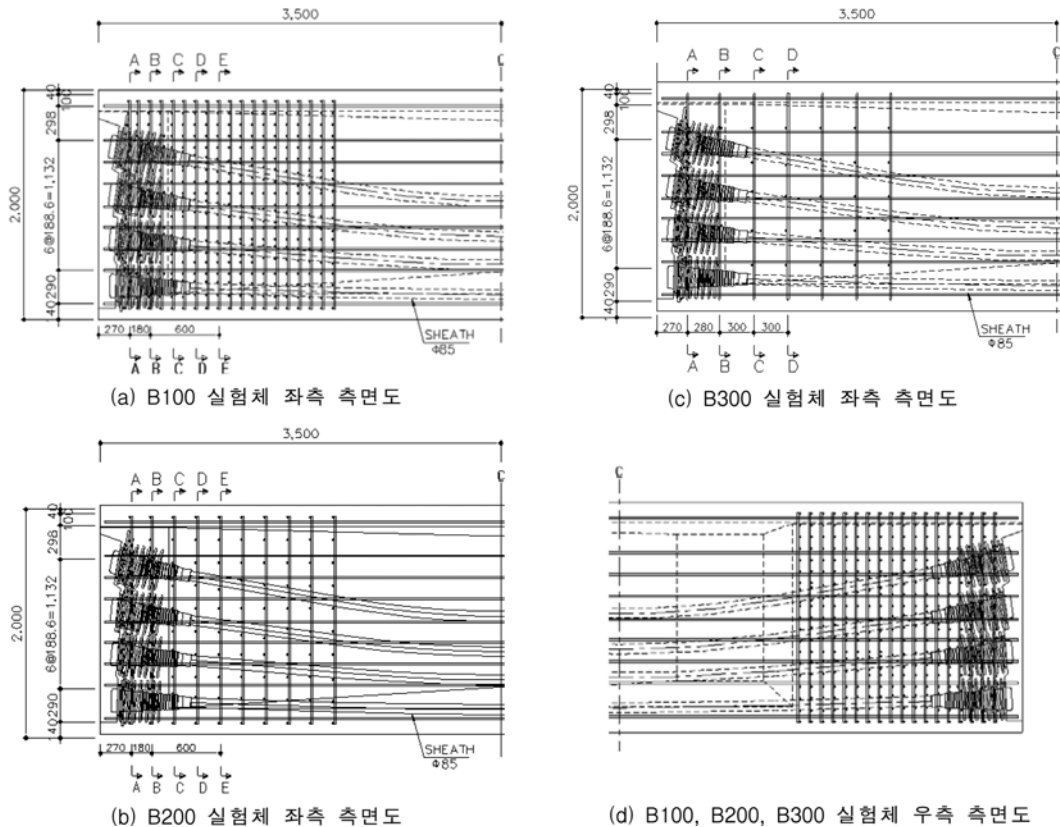


그림 5. 실험체 측면도

표 1. 파열보강철근 간격 및 규격

실험체	파열보강철근 간격 (mm)		직경 (mm)	항복강도 (MPa)
	수직방향	수평방향		
B100	100	100	16	300
B200	200	200	16	300
B300	300	300	16	300

시체를 실험체와 동일한 조건으로 7일간 양생한 후에 강도 테스트를 수행한 결과, 평균압축강도는 53 MPa로서 설계압축강도 40 MPa보다 30% 이상 발휘되었다.

3.2 계속 게이지

긴장 시 포스트텐션 부재의 파열 변형은 부재의 내부에서 크게 발생하기 때문에 변형을 게이지는 콘크리트를 타설하기 전에 파열보강철근에 설치하였다. 3.1절의 그림 5에 표시된 A, B, C, D, E 단면은 계속 게이지가 설치된 단면을 나타낸 것이다. B100과 B200 실험체의 계속 게이지 설치단면 간의 간격은 200 mm이고, B300 실험체의 게이지 설치단면 간의 간격은 파열보강철근 간격과 같이 300 mm이다. 표 2에는 실험에 사용된 철근 변형률 게이지의 기본사양을 나타냈고, 그림 6에는 각 실험체의 단면별 게이지 설치 정보를 나타냈다.

표 2. 철근 변형률 게이지의 기본사양

저항치	1200
사용온도 범위	-20 ~ +80°C
온도보상 범위	+20 ~ +80°C
실온에의 변형률 한계	3% (30000×10 ⁻⁶)
실온에의 피로 한계	1×10 ⁻⁶ (±1500×10 ⁻⁶)

4. 실험체 긴장 실험

4.1 실험체 긴장작업

실험체의 긴장력은 bar 단위로 도입되었다. 따라서 이 논문에서는 긴장력을 SI 단위계로 환산하는 대신 bar 단위로 표시하기로 한다. 긴장작업에 사용된 인장기의 잭 실린더 단면적은 894.57 cm²이고, 실험체의 설계 긴장력은 텐던당 150 bar이다. 긴장작업은 표 3에 나타난 각 긴장단계별로 목표 긴장력까지 4개의 텐던을 순차적으로 긴장하는 방식으로 진행되었다. 먼저 1단계에서는 표준 PSC I 거더와 동일한 긴장순서(1-2-3-4 텐던 순서)로 설계 긴장력까지 긴장력을 도입하였고 그 결과, B100 실험체의 최대 파열 변형률은 1번과 2번 텐던 사이에서 발생하였고, B200과 B300 실험체의 최대 파열 변형률은 2번과 3번 텐던 사이에서 발생하였다. 2단계 이후의 긴장단계부터는 정착부의 파열거동에 가장 불리한 조건으로 긴장력을 도입하기 위해 긴장순서를 설계 긴장력이 도입된 1단계에서 최대 파열 변형률을 유발시킨 2번과 3번 텐던을 먼저 긴장하고, 1번과 4번 텐던을 나중에 긴장하였다. 즉, 2단계부터는 각 긴장단계별로 표 3에 나타난 목표 긴장력까지 2-3-1-4번 텐던 순서로 순차적으로 긴장하였다.

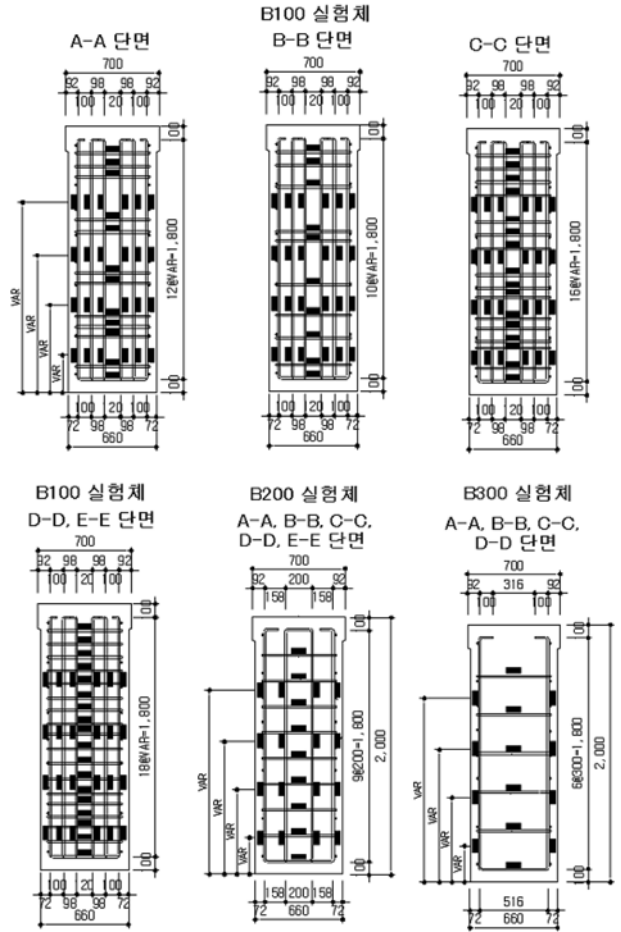


그림 6. 철근 변형률 게이지 설치도면

표 3. 긴장단계 별로 도입된 긴장력(bar)

긴장단계	B100	B200	B300
1	150	150	150
2	250	250	210
3	320	320	270
4	370	370	320
5	410	410	370
6			410

4.2 할렬 변형률

B100, B200, B300 실험체의 할렬보강철근은 정착단부 표면으로부터 40 mm 안쪽에 배근하였다. 할렬 변형률은 그림 7과 같이 총 16개의 철근 변형률 게이지를 수평방향과 수직방향 할렬보강철근에 설치한 후에 각 긴장단계별로 계속하였다.

그림 8과 9에는 그림 7에 설치한 변형률 게이지 중 수평방향과 수직방향 할렬 변형률이 가장 크게 발생하는 대표적인 위치에서의 할렬 변형률을 긴장단계 별로 나타냈다. 설계 긴장력 도입 시 수평방향 최대 할렬 변형률은 B100, B200, B300 실험체에서 각각 35.1, 84.2, 86.6 micro strain이 발생하였고, 설계 긴장력의 2.7배까지 긴장력을 도입하였을 때의 수평방향 최대 할렬 변형률은 B100, B200, B300 실험체에서 각각 310.1, 408.3, 352.2 micro strain이 발생하였다. 설계 긴장력 도입시 수직방향 할렬 변형률은 모든 실험체에서 30.0 micro strain 이하로 발생하였고, 설계 긴장력

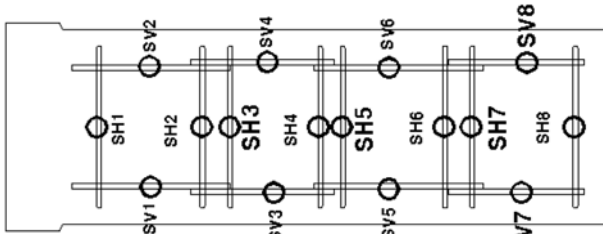


그림 7. 할렬 변형을 게이지 설치도

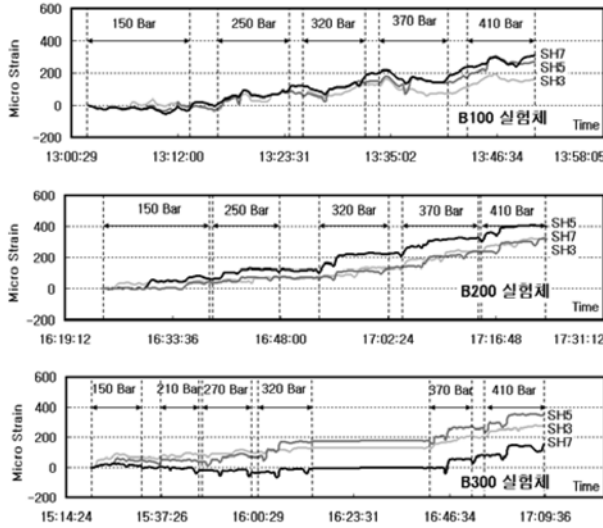


그림 8. 수평방향 할렬 변형률

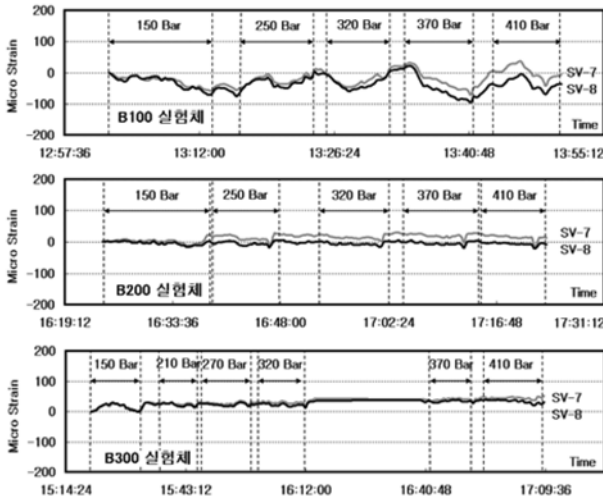


그림 9. 수직방향 최대 할렬 변형률

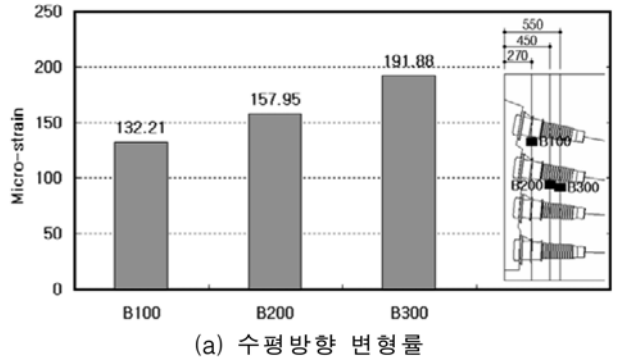
의 2.7배까지 긴장하였을 때의 수직방향 최대 할렬 변형률 역시 모든 실험체에서 50.0 micro strain 이하로 발생하였다. 표준 PSC I 거더의 정착단부에서 할렬 변형률은 수직방향보다는 수평방향으로 수배 이상 크게 발생함을 알 수 있었다. 또한 긴장력을 설계 긴장력의 2.7배까지 도입한 후에 정착단부 표면을 육안으로 살펴 본 결과, 할렬 균열은 발생하지 않았다.

4.3 파열 변형률

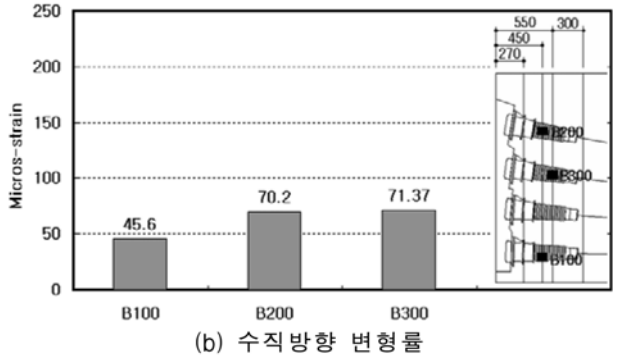
여기서는 실험체에 긴장력을 단계적으로 증가시키면서 계측된 파열 변형률을 분석하고, 분석된 결과를 통해 정착단부 내에서의 파열 변형률 분포 및 파열 거동 매커니즘, 균열 긴장력 산정, 파열 균열 평면에 대해 살펴보기로 한다.

4.3.1 파열 변형률 비교

그림 10과 11에는 설계 긴장력과 설계 긴장력의 2.7배로 긴장하였을 때의 최대 파열 변형률을 나타냈다. 계측 데이터를 기초로 하여 최대 파열 변형률의 발생 위치를 살펴보면, 그림 10과 11의 우측에 나타난 것과 같이 수직방향으로는 실험체와 긴장단계별로 차이를 보였지만 종방향으로는 모든 실험체가 B-B단면, 즉 실험체 좌측 단부로부터 450 mm 또는 550 mm(정착장치로부터 300 mm 또는 400 mm) 떨어진 위치에 설치된 변형률 게이지에서 가장 크게 발생하였다. 설계 긴장력을 도입한 경우에 수직방향 최대 파열 변형률은

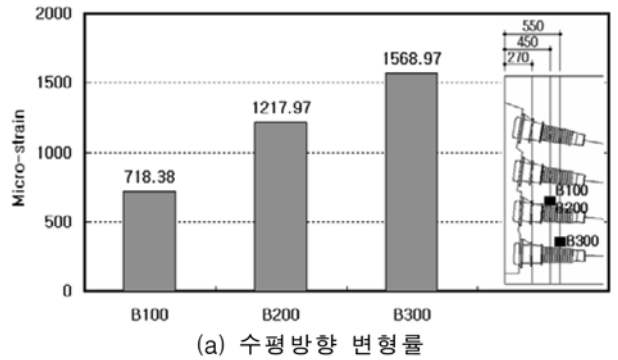


(a) 수평방향 변형률

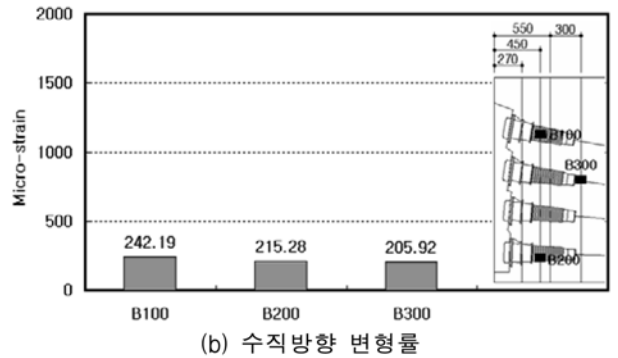


(b) 수직방향 변형률

그림 10. 설계 긴장력 도입시 최대 변형률



(a) 수평방향 변형률



(b) 수직방향 변형률

그림 11. 설계 긴장력의 2.7배 긴장시 최대 변형률

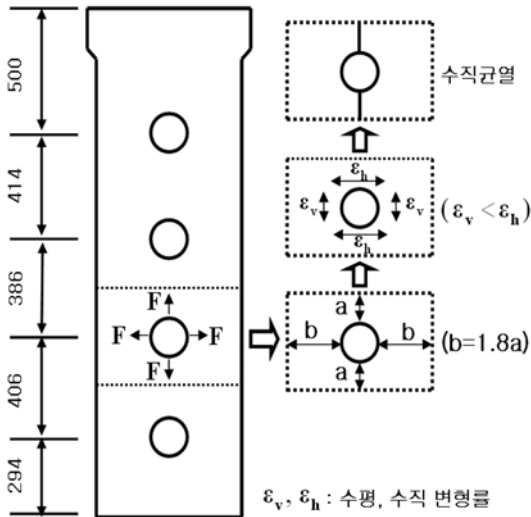


그림 12. PSC I 거더의 파열 변형 메커니즘

수평방향 최대 파열 변형률의 34.5%(B100 실험체), 44.4%(B200 실험체), 37.2%(B300 실험체) 수준으로 발생하였고, 설계 긴장력의 2.7배를 도입한 경우에 수직방향 최대 파열 변형률은 수평방향 최대 파열 변형률의 34.7%(B100 실험체), 17.7%(B200 실험체), 13.1%(B300 실험체) 수준으로 발생하였다. 모든 실험체에서 수평방향 파열 변형률이 수직방향 파열 변형률보다 크게 발생한 이유는 그림 12와 같이 표준 PSC I 거더의 정착장치 하나에 저항하는 콘크리트 블록의 가로방향 단면적이 세로방향 단면적보다 1.8배 가량 크기 때문에 파열력에 저항하는 단면이 상대적으로 작은 세로단면에 직각방향으로 발생하는 수평방향 변형률 ϵ_h 가 가로단면에 직각방향으로 발생하는 수직방향 변형률 ϵ_v 보다 크게 발생하였기 때문이다.

4.3.2 파열 변형률 분포

그림 13에는 설계 긴장력 도입 시 세 번째 텐던 위에 배근된 수평방향 파열보강철근의 변형률에 대한 종방향 분포를 나타냈다. 설계 긴장력 도입 시 수평방향 파열 변형률은 파열보강철근이 적게 배근될수록 크게 발생하였다. 그림 13에서 B300 실험체의 파열 변형률이 B100과 B200 실험체와 달리 B-B 단면에서의 변형률이 A-A 단면에서의 변형률보다 작게 나타난 이유는 설계 긴장력 도입 시 B300 실험체의 수평방향 최대 파열 변형률이 A-A 단면과 B-B 단면 사이에서 발생하나 변형률 계이저를 A-A 단면과 B-B 단면 사이에서 설치할 수 없어 실제로 발생하는 수평방향 최대

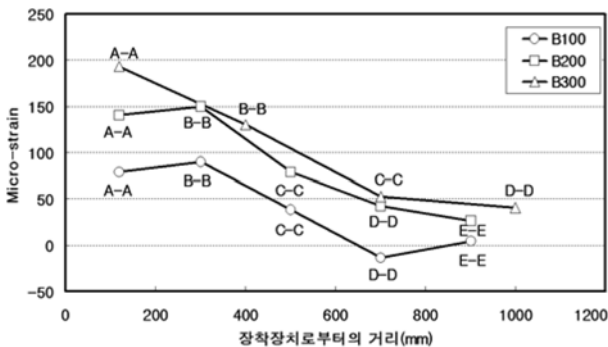
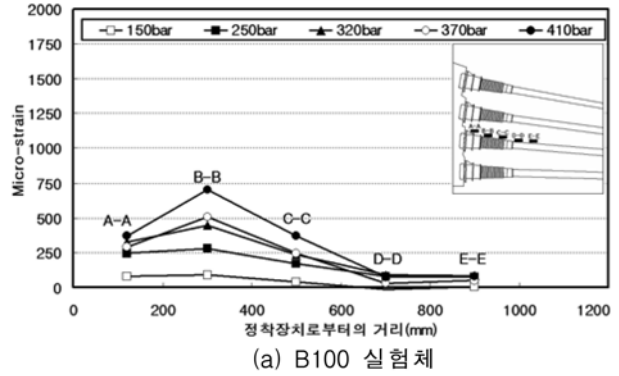
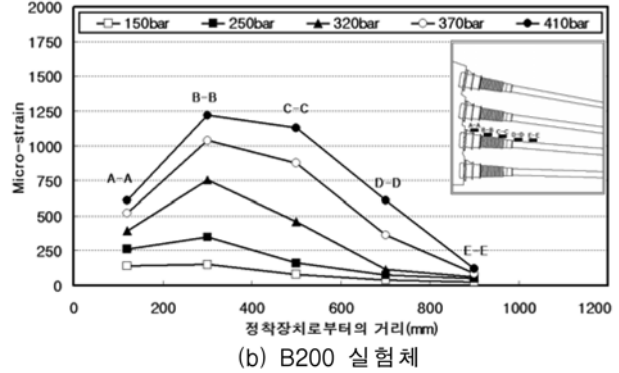


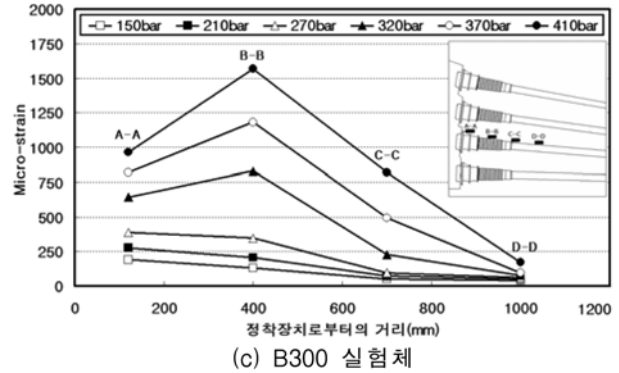
그림 13. 파열보강철근량에 따른 수평방향 파열 변형률 분포



(a) B100 실험체



(b) B200 실험체



(c) B300 실험체

그림 14. 수평방향 파열 변형률 분포

파열 변형률을 계측하지 못 하였기 때문이다.

그림 14에는 세 번째 텐던 위에 배근된 수평방향 파열보강철근의 긴장단계별 변형률 분포를 나타냈다. 각 긴장단계에서 수평방향 파열 변형률의 증가 폭은 파열보강철근이 적게 배근될수록 증가하고, 최대 파열 변형률은 B-B 단면의 좌우측(정착장치로부터 250 mm에서 400 mm 사이)에서 발생하였다. 그림 14에서 각 긴장단계별 그래프의 기울기를 고려해 볼 때, 수평방향 최대 파열 변형률의 종방향 위치는 긴장력이 증가함에 따라 최초에 설계 긴장력이 도입되었을 때의 위치보다 조금 우측(부재의 중앙부 방향)으로 이동하였다.

4.3.3 균열 긴장력 평가

실험체의 균열 긴장력은 파열보강철근의 변형률이 콘크리트의 균열 변형률을 초과할 때까지 긴장된 힘으로 정의할 수 있다. 도로교설계기준에 제시된 탄성계수 식 $(0.03\sqrt{f_{ck}} + 7,700 \text{ MPa})$ 과 인장강도 식 $(0.63\lambda\sqrt{f_{ck}} \text{ Mpa})$ 을 이용하여 콘크리트의 균열 변형률을 산정하면 144 micro strain이 된다. 실험체의 균열 변형률이 144 micro strain이라고 가정하면, 설계 긴장력에서 B100 실험체의 파열 변형

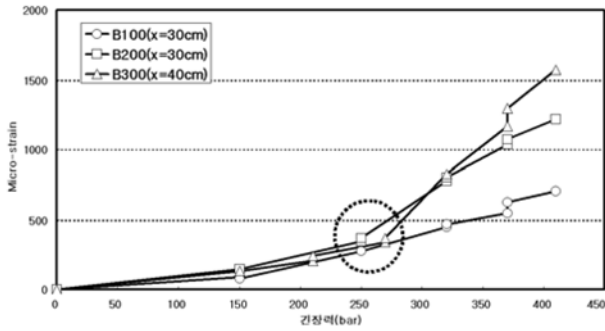
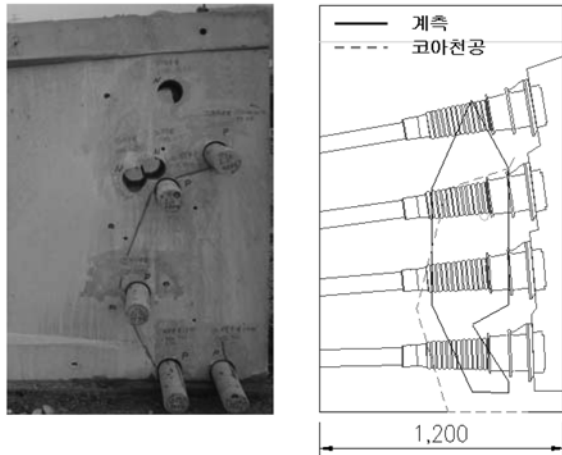
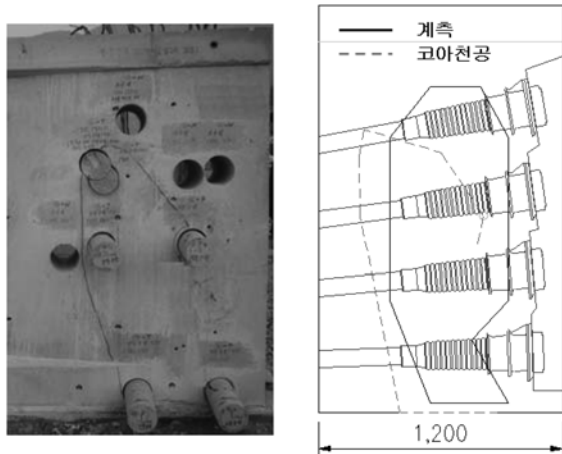


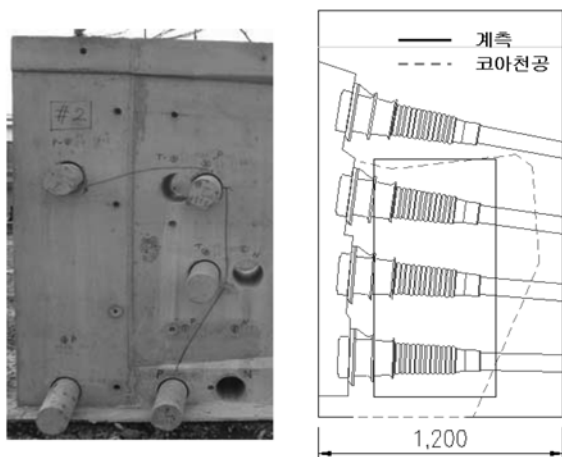
그림 15. 긴장력-변형률 곡선(B-B 단면)



(a) B100 실험체



(b) B200 실험체



(c) B300 실험체

그림 16. 정착단부 균열 평면

를(132.2 micro strain, 그림 10(a) 참고)은 균열 변형률의 92% 수준이 되고, B200과 B300 실험체는 균열 변형률을 초과하여 파열균열이 발생하게 된다. 그러나 그림 15와 같이 최대 파열 변형률이 발생하는 B-B 단면에서의 긴장력-변형률 곡선을 살펴보면, 250 bar의 긴장력이 도입되었을 때 그 그래프의 기울기가 급격히 변화하기 때문에 실험체의 균열 긴장력은 250 bar(설계 긴장력의 1.6배)로 볼 수 있다. 250 bar의 긴장력이 도입되었을 때의 변형률은 약 300 micro strain 정도이다. 도로교설계기준에 제시된 식으로 구한 균열 변형률과 실험 데이터를 분석하여 구한 균열 변형률이 큰 차이를 보이기 때문에 균열 긴장력을 정확히 평가하는 데는 어려움이 있다. 따라서 실험 데이터의 신뢰도를 평가하고, 실질적인 균열 긴장력을 평가하기 위해 코어 천공을 실시하였다. 코어 천공을 위해 먼저 계측된 파열 변형률이 300 micro strain 이상인 파열보강철근을 대상으로 균열평면(그림 16 좌측 실선)을 그리고, 이 균열평면으로 이용하여 그림 16 우측 사진과 같이 코어 천공을 실시하였다. 그림 16 좌측 그래프에서 코어 천공에 의한 균열평면이 계측결과에 의한 균열평면보다 넓게 그려진 이유는 코어 천공에 의한 균열평면은 균열 끝(tip)을 기준으로 그린 것이고, 계측에 의한 균열평면은 300 micro strain 이상인 파열보강철근의 위치를 기준으로 그렸기 때문에 두 균열평면이 다소 간의 차이를 보였으나 전체적으로 두 균열평면은 잘 일치함을 알 수 있다. 각 실험체 별로 균열 긴장력을 정확히 추정하기에는 데이터가 부족한 면이 있으나 세 실험체의 대략적인 균열 긴장력은 250 bar(설계 긴장력의 1.6배, 2,240 kN) 내외로 추정할 수 있다.

5. 결 론

이 논문은 현재 널리 사용되고 있는 표준 PSC I 거더의 구조적 안전성을 확보하면서 정착단부의 철근배근 상세를 개선하여 제작성을 향상시키기 위한 기초연구로서 표준 PSC I 거더의 정착단부와 동일한 단면형상을 갖는 실물 모형의 실험체 세 개를 제작하여 긴장실험을 수행하였고, 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 각 실험체의 수평방향 변형률은 수직방향 변형률보다 설계 긴장력 도입 시 2.3~2.9배 수준으로 크게 발생하였고, 설계 긴장력의 2.7배 도입 시 3.0~7.6배 수준으로 크게 발생하였다. 따라서 표준 PSC I 거더의 수평방향 파열보강철근은 현행 표준 PSC I 거더의 구조계산서와 같이 수평방향 파열보강철근에 대한 해석과정 없이 수직방향 파열보강철근과 동일한 간격으로 배근해서는 안 되고, 수평방향 파열보강철근에 대해서도 도로교설계기준 등에 제시된 해석방법들을 이용하여 보강량 및 배근 간격을 산정하여 설계해야 함을 확인하였다.
2. 모든 실험체(파열보강철근 간격이 100 mm, 200 mm, 300 mm인 실험체)의 파열균열 긴장력은 설계 긴장력의 1.6배 내외로 나타났다. 따라서 표준 PSC I 거더의 일반적인 설계 긴장력 수준에서는 정착단부에 파열균열이 발생하지 않음을 확인하였다.
3. 표준 PSC I 거더의 제작 불확실성 등으로 인해 설계 긴

장력에서 파열균열이 발생할 가능성을 배제할 수 없으므로 설계 긴장력의 2.7배까지 긴장력을 도입하여 파열균열이 발생한 후의 거동을 검토해 본 결과, 파열보강철근 간격이 100 mm, 200 mm인 실험체의 파열보강철근은 항복되지 않았고, 파열보강철근 간격이 300 mm인 실험체는 수평방향 파열보강철근의 일부만이 항복하는 결과를 보였다.

4. 설계 긴장력 도입 시, 표준 PSC I 거더의 수평방향 파열 변형률은 정착표면으로부터 거더의 폭(660 mm) 만큼 떨어진 위치까지 발생하였다. 한 쪽 정착단부에 필요한 수평방향 파열보강철근을 도로교설계기준에 제시된 근사해법으로 구해보면, 정착표면으로부터 825 mm($=2.5d_{brst}$) 떨어진 구간 내에 총 16가닥(SD300, $\phi 16$)이 필요하나 표준 PSC I 거더에는 정착표면으로부터 20,000 mm 떨어진 구간까지 총 361가닥(SD300, $\phi 16$)이 필요 이상으로 배근되었다.
5. 이 논문의 실험결과와 도로교설계기준에 제시된 근사해법을 적용해 볼 때, 수평방향 파열보강철근은 정착표면으로부터 825 mm($=2.5d_{brst}$) 구간 내에 배근하고, 실험결과로부터 획득한 수평방향 파열 변형률의 분포를 고려하여 보강철근을 적절한 간격으로 배근할 경우 파열보강철근량을 상당히 줄일 수 있고, 철근조립 및 콘크리트 타설 시 작업성도 크게 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 한국도로공사 도로교통연구원 및 2010년도 경원대학교 지원에 의한 결과의 일부입니다.

참고문헌

- 건설교통부(2007) **도로교설계기준**, 사단법인 한국도로교통협회.
 오병환, 임동환, 유승운(1994) 단일텐던 및 복수텐던이 설치된 프리스트레스 콘크리트 부재의 정착부 거동 연구, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제14권 제6호, pp. 1329-1339.
 한국콘크리트학회(2006) **콘크리트 구조부재의 스트럿-타이 모델 예제집**, 사단법인 한국콘크리트학회, pp. 91-99.
 Bain, S., Mugurama, H., and Ogaki, Z. (1957) Anchorage zone stress distribution in post-tensioned concrete members, *Proceeding of world Conference on Prestressed Concrete*, Univ. of California, San Francisco, CA, pp. 1-14.
 Zielinski, J.L. and Rowe, R.E. (1960) *An Investigation of the Stress Distribution in the Anchorage Zones of Post-Tensioned Concrete Members*, Research Report No. 9, Cement and Concrete Association, London, September.
 Breen, J.E., Cooper, R.L., and Gallaway, T.M. (1975) *Minimizing construction Problems in Segmentally Precast Box Girder Bridges*, Research Report No. 121-6F, Center for Highway Research, The University of Texas at Austin, August.

(접수일: 2010.3.4/심사일: 2010.4.2/심사완료일: 2010.4.19)