

# 건식접합부를 갖는 프리캐스트 세그먼트 PSC-I형 거더의 2차원 비선형해석

## A Two-Dimensional Nonlinear Analysis of Precast Segmental PSC-I Girder with Dry Joint

김 광 수\*      김 태 완\*\*      박 준 명\*\*\*      박 선 규\*\*\*\*  
Kim, Kwang-Soo      Kim, Tae-Wan      Park, Jun-Myung      Park, Sun-Kyu

### Abstract

To satisfy with the increased requirements of cost reduction, labor saving, and rapid construction, the purpose of this study is to investigate the structural behavior of PSC monolithic and spliced girders. Three tests were conducted on small-scale girder specimens. This paper presents the result of experimental studies in terms of the load-deflection behavior. Different joint type and tendon amount were investigated as major variables. The monolithic girder was arranged with three tendons. The spliced girder consisted of five segments connected by three tendons. In addition, five-segmented girders connected by more than three tendons were built to examine the effect of the tendon amount. The experimental results show the difference of behavior between monolithic and spliced girders. Moreover, nonlinear finite element method analysis was utilized to verify the experimental result.

### 요 지

본 연구에서는 건설비용, 노무비 절감, 공기단축 등의 요구에 대응하기 위해, 일체형 및 분절형 PSC 거더의 구조적인 거동을 평가하는데 연구목적을 두었다. 본 논문에서는 동일한 단면을 갖는 총 3개의 실험체를 제작하였으며, 접합부와 긴장재의 양을 주요변수로 하여 모멘트-처짐 거동을 비교 분석하였다. 첫 번째 거더는 거더를 일체로 제작하여 세 개의 강연선을 배치하였고 두 번째 거더는 5개의 분절된 세그먼트로 제작하여 세 개의 강연선을 이용하여 각각의 세그먼트를 접합하였다. 그리고 세 번째 거더는 두 번째 거더와 같이 분절된 거더로써 추가 강연선을 배치하였다. 수행된 실험의 결과를 분석함으로써 일체형 거더와 분절형 거더의 거동 차이를 알 수 있었으며, 수행된 2차원 비선형유한요소해석은 실험결과와 비교하여 모멘트-처짐 곡선을 비교적 잘 예측하였다.

**Keywords :** Precast, Segment, Spliced girder, Nonlinear analysis

**핵심 용어 :** 프리캐스트, 세그먼트, 분절거더, 비선형해석

\* 정희원, 성균관대학교 과학기술연구소 책임연구원

\*\* 정희원, 성균관대학교 건설환경시스템공학과 BK21 연구교수

\*\*\* 정희원, 성균관대학교 건설환경시스템공학과 박사과정

\*\*\*\* 정희원, 성균관대학교 건설환경시스템공학과 교수

E-mail : whitesky@skku.edu 031-290-7530

• 본 논문에 대한 토의를 2007년 10월 31일까지 학회로 보내 주시면 2008년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

## 1. 서 론

프리캐스트 세그먼트 공법은 1950년대에 독일에서 개발된 현장타설 프리스트레스 세그먼트 공법이 확대 적용되면서 PSC교의 시공 효과까지 극대화시킬 수 있는 방법으로 각광을 받고 있다.<sup>(10)</sup> 국외의 경우 PBS(Prefabricated Bridges System)을 통하여 하부구조에서 상부구조 전체를 프리캐스트 부재로 제작하여 시공하는 기술이 이미 안정화<sup>(8)(9)</sup> 단계에 도달하였으나, 대부분이 교량의 상부구조는 상자형 단면으로 구성되어 있으며 I형 단면에 대한 시공사례는 많지 않은 실정이다. 국내에서는 분절에 관한 실험<sup>(1)(7)</sup>이 수행된 바 있으며, 김현호<sup>(2)</sup>는 일체형거더에 대하여 분절부응력을 검토하였고 김광수<sup>(3)</sup>는 프리캐스트 세그먼트거더에 관한 파괴실험을 수행한 바 있다. 본 연구에서 실험체는 지간장 4m의 일체형거더 하나와 5개의 세그먼트로 제작된 건식접합부를 갖는 2개의 분절형 거더로 총 거더 3본을 제작하였다. 1차간장 이후 바닥판을 일체로 타설하였으며, 시공단계별 요구되는 긴장력을 나누어 도입하였다. 이후, 하중재하실험을 실시하였고, 실험결과와 비교하기 위하여 대상 실험체에 대하여 평면응력(plain stress)요소를 사용하여 2차원 비선형 유한요소해석을 수행하였다. 해석에 사용된 프로그램은 범용유한요소 해석프로그램인 다이아나(DIANA)를 사용하여 검증하였다.

## 2. 실험

### 2.1 실험개요

본 실험에서는 일체형 거더와 분절형 거더의 거동 차이를 분석하기 위하여 3본의 실험체를 제작하여 실험을 수행하였다. 실험체는 3가지 형태로 제작하였으

며, 하나는 일체형 거더(CG)로 제작하고 두번째는 일체형 거더와 동일한 단면과 긴장력을 가지고 5개의 세그먼트로 구성된 분절형 거더(PSG1)로 제작하였으며, 나머지는 단면의 형태 같으나 추가 긴장력을 도입한 분절형 거더(PSG2)로 제작하였다. 위에서 언급된 3개의 실험체는 다음의 Table 1과 같이 거더의 길이는 총 4 m로 동일하게 하였으며, 분절형은 800 mm 씩 5개로 분절하여 제작하였다.

### 2.2 실험 계획 및 제작

본 실험에서 사용된 콘크리트의 설계강도는 거더의 경우 40 N/mm<sup>2</sup>이고, 바닥판의 경우 28 N/mm<sup>2</sup>으로 설계된 레미콘 제품을 사용하였다. 레미콘의 현장 타설시의 슬럼프는 120 mm, 공기량은 4.5%로 측정되었다. 실험체에 배근된 철근은 설계항복응력이 392 N/mm<sup>2</sup>인 SD40철근을 사용하였으며, D10, D13, D16 철근을 배근하였다. 강연선은 SWPC 7B인 직경 12.7 mm의 제품을 사용하였으며, 사용된 강연선의 물성치는 Table 2와 같다.

본 실험에서 사용된 실험체는 도로교설계기준에 준하여설계하였으며, 단단계 긴장 방법을 사용하여 2차레에 걸쳐 긴장을 실시하였다. 보 실험체의 분절 일체화와 자중에 의한 휨응력에 저항할 수 있도록 1차 긴장력을 도입하였고 바닥판과 실험하중에 저항하도록 2차 긴장을 도입하였다.

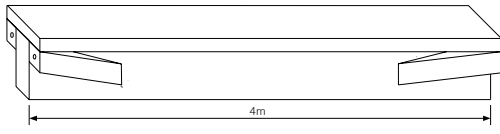
실험체의 단면은 250 mm×350 mm의 거더와 55 mm ×100 mm의 바닥판으로 구성되고 철근 배근은 종방향 철근 D13, 전단 철근 D10, 전단기와 브라켓 내부 철근 D16을 배근하였고, 거푸집과 철근 사이의 간격은 30 mm 스페이서를 사용하여 확보하였다. 실험체와 단면 및 브라켓의 형상은 Fig. 1~3에 각각 나타내었다.

Table 1 실험체 상세

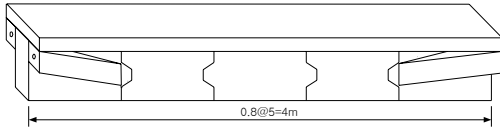
Specimens	Length (mm)	Tendon quantity (EA)	Jacking force (kN)
CG	4,000	3	294
PSG1	800@5	3	294
PSG2	800@5	5	490

Table 2 PS강연선의 물성치

Specimens	Strand diameter (mm)	Area (mm <sup>2</sup> )	Tensile strength (kN)	Elongation (%)
SWPC 7B	12.7	98.71	183.26	3.5이상

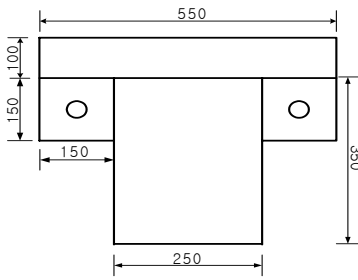


(a) CG실험체

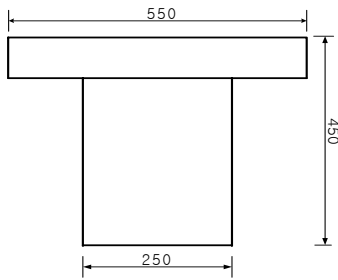


(b) PSG1 및 PSG2 실험체

Fig. 1 실험체 형상



(a) 지점부 단면



(b) 중앙부 단면

Fig. 2 지점 및 중앙부의 단면(mm)

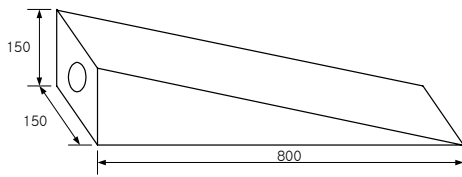
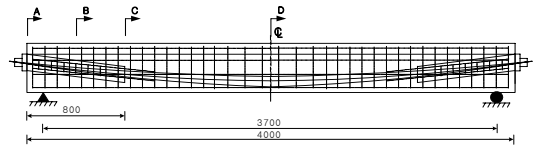
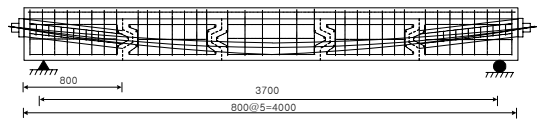


Fig. 3 실험체 양측면 브라켓 형상(mm)

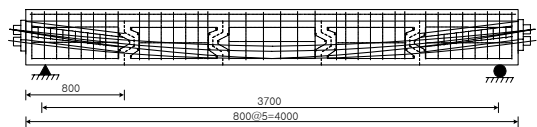
강연선은 일체형과 분절형 실험체에 3개, 보강된 분절형 실험체에 2개를 추가하여 5개를 배치하였다. 1차 긴장재는 거더의 중심축상을 통과하도록 배치하고, 2차 긴장재는 양쪽 브라켓에서 출발하여 지간 중앙을 중심으로 엇갈리게 배치하였다. 추가로 배치한 긴장재는 1차 긴장재의 소요 정착 면적과 겹치지 않게 1차 긴장재와 100 mm떨어진 아래쪽에 배치하였다. Fig. 4는 거더에 긴장된 강연선의 배치를 간략하게 나타내었다.



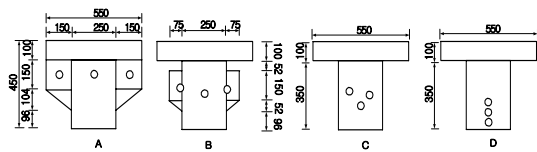
(a) CG



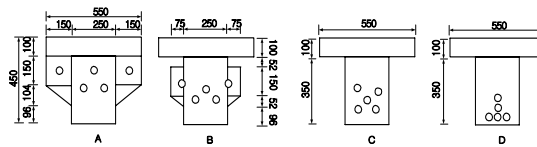
(b) PSG1



(c) PSG2



(d) CG, PSG1



(e) PSG2

Fig. 4 실험체별 PS강연선의 배치형상(mm)

세그먼트 교량에서 전단키는 필수적으로 사용되기 때문에 전단기에 대한 설계가 매우 중요하다. 국내외에서 발표된 전단기의 돌출비 및 경사각( $\theta$ )에 대한 여러 논문들을 통해 ASSHTO에서 추천하는 저면과 돌출 높이의 비가 1/2인 경우가 가장 큰 전단력을 받는 것으로 밝혀졌고 경사각이 60°일 때가 가장 효율적인 것으로 나타났으므로, 본 연구에서는 사다리꼴 전단기의 돌출비를 1/2, 경사각은 60°로 정하였다.<sup>(6)</sup>

### 2.3 재하 및 측정방법

하중재하는 1,000kN 용량의 U.T.M장치를 사용하여 2점 재하 하였으며 재하된 하중량을 측정하기 위하여 재하 장치 하부면에 로드셀을 설치하였다. 각 실험체에 정해진 양의 외부 긴장력을 가한 뒤 하중재하 방식으로 하중을 재하 하였으며, 다음의 Fig. 5은 실험에 사용된 변위계(LVDT)와 하중재하 위치를 나타내며, Fig. 6은 실험전경을 나타내고 있다.

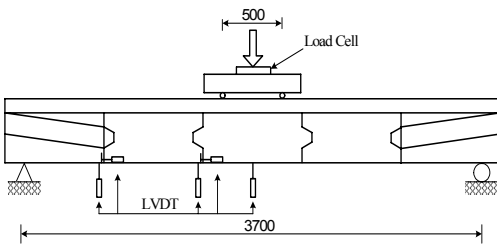


Fig. 5 하중재하 하도(mm)



Fig. 6 실험전경

실험체의 실험결과 데이터를 얻기 위해 콘크리트 변형률게이지, 철근 변형률게이지, LVDT를 사용하였다. 실험체의 변위를 측정하기 위하여 거더 지간의 L/2, L/5, 2L/5 지점에 LVDT를 설치하였고, 또한 분절형의 경우 하중 재하시 분절부의 이격거리를 측정하고자 분절부에 LVDT를 수평방향으로 설치하였다. 철근 변형률게이지는 각각 지간 중앙, 정착부, 분절부의 철근에 콘크리트를 타설하기 전에 설치하였고, 콘크리트 변형률게이지는 거더 상하부와 바닥판의 상하부에 설치하여 하중 재하시 중립축의 변화를 관찰하였다.

### 3. 실험결과 및 분석

실험체의 제작에 사용된 콘크리트의 하중재하 시점에서의 공시체 강도 측정결과 Table 3과 같다. 일정한 시간을 두고 실험체를 제작한 보강된 분절형 실험체(PSG2)의 경우 따로 공시체의 강도를 측정하였다.

#### 3.1 균열 및 파괴 양상

일체형 실험체(CG)는 전형적인 휨파괴를 나타내었으며, 균열 형태는 휨균열로서 초기균열은 127.4 kN에서 거더 중앙 하단에서 발생하였다. 하중이 증가할수록 균열길이가 길어지고 휨균열의 수와 폭이 증가하는 일반적인 현상을 나타내었다. 하중 재하는 극한 하중인 263.6 kN에서 파괴의 징후를 보여 하중재하를 중지하였다. 분절형 실험체(PSG1)의 경우 73.5kN을

Table 3 실험체의 콘크리트 물성치

Test strength(kN/mm <sup>2</sup> )		Girder	Slab
CG PSG1	Compression Strength	40.42	22.20
	Tensile Strength	2.75	2.55
	Flexural Strength	3.94	2.57
PSG2	Compression Strength	39.51	22.55
	Tensile Strength	2.49	1.87
	Flexural Strength	3.45	2.82

전후해서 이격거리가 급격히 증가하기 시작하였고, 초기균열은 일체형(CG)과 비슷한 하중인 135.2 kN에서 발생하였지만 균열의 발생 위치는 하중 재하점 아래 바닥판 하부에서 발생하기 시작하였다. 하중이 증가할수록 균열은 바닥판 상부로 이어지고 전단기 상부에서도 균열이 관찰되었다.

174.0 kN에서 일부 강선의 파단으로 인하여 하중 재하를 중지하였다. 추가 긴장재가 보강된 분절형 실험체(PSG2)는 107.8 kN까지 분절부의 이격거리가 허용 균열폭인 0.12 mm보다 작게 나타났으며, 147 kN에서 분절형 실험체(PSG1)와 같은 하중 재하점 아래 바닥판 하부에서 초기균열이 발생하기 시작하였다. 발생한 균열은 하중이 증가할수록 바닥판 상부로 발달하였고, 하중이 196 kN에 도달한 후에는 지간 중앙단면에서 휨균열이 발생하면서 바닥판 상부의 균열이 더디게 진행되었다. 보강된 분절형 실험체(PSG2)도 246.0 kN의 하중에서 분절형 실험체(PSG1)와 마찬가지로 일부 강연선의 파단으로 하중 재하를 중지하였다.

### 3.2 모멘트-처짐 관계

일체형(CG) 실험체와 분절형(PSG1, PSG2) 실험체의 하중-처짐 관계를 비교한 그래프를 Fig. 7에 나타내었다.

우선, 실험체별로의 항복하중을 비교해 보면 일체형

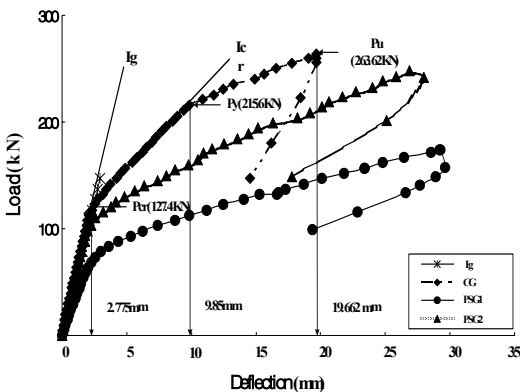


Fig. 7 하중-변위 관계

(CG)의 경우 254.8 kN에서 인장철근이 항복하는 것으로 나타났고, 분절형(PSG1)은 분절부라는 불연속면의 존재로 인해 극한하중인 174.0 kN을 재하했음에도 인장철근의 변형률은 미미했다. 보강된 분절형 실험체(PSG2) 역시 분절부라는 실험변수로 인해 인장철근의 변형률은 크지 않았지만 지간 중앙에서 휨균열이 발생하기 시작한 196 kN 이후에는 변형률이 현저히 증가하는 것을 알 수가 있었다.

극한하중에서 발생한 최대 처짐은 일체형(CG) 실험체의 경우 263.6 kN에서 19.69 mm이 발생하였고, 분절형(PSG1) 실험체는 174.0 kN에서 30 mm, 보강된 분절형(PSG2) 실험체는 246.0 kN에서 26.85 mm가 발생하였다.

### 3.3 모멘트-분절부 이격거리

분절형 거더의 하중별 분절부의 이격거리를 나타내는 그래프는 Fig. 8에 나타내었으며, 분절형(PSG1) 실험체의 지간 중앙쪽 분절부의 이격거리는 73.5 kN을 기점으로 급격히 증가하기 시작하였고, 극한하중인 174.0 kN에서 이격거리가 7.1 mm로 계측되었다. 이에 반해 2개의 추가 긴장재를 보강한 분절형(PSG2) 실험체의 경우에는 107.8 kN를 기점으로 이격거리가 벌어지기 시작하였고, 174.0 kN의 하중에서 1.93 mm의 이격거리에 불과하였다. 또한, 극한 하중인 246.0 kN에서 이격거리는 4.87 mm로 계측되었다.

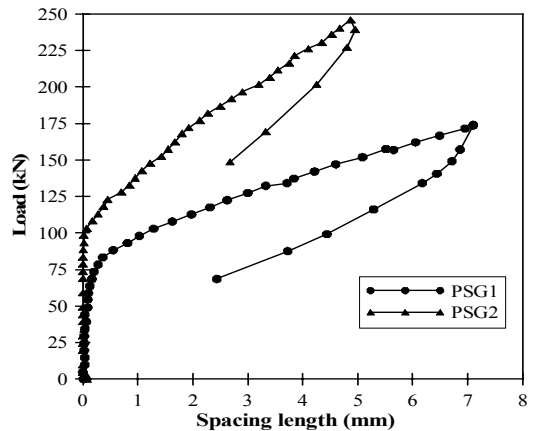


Fig. 8 하중-이격거리 관계

#### 4. 유한요소해석

본 연구에서는 유한요소해석을 수행하기 위하여 범용유한요소 해석프로그램인 DIANA를 사용하였다. 콘크리트는 4변형 4절점 2차원 평면응력(plain stress) 요소를 사용하였으며, 철근과 강연선의 경우 rebar요소를 사용하여 모델을 구성하였다. 다음의 Fig. 9은 일체형(CG)과 분절형(PSG1, PSG2)에 대한 전체모델링을 나타내고 있다.

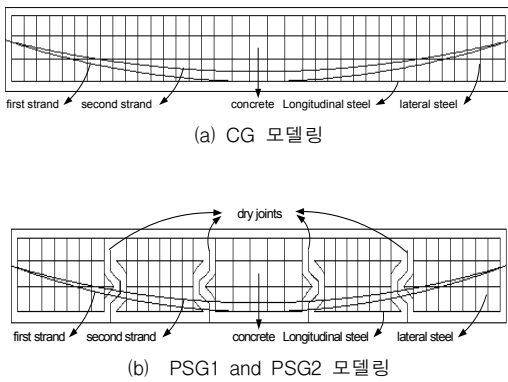


Fig. 9 CG, PSG1 및 PSG2 실험체의 모델링

#### 4.1 재료모델

유한요소해석에 적용된 콘크리트의 재료모델을 다음의 Fig. 11에 나타내었다.

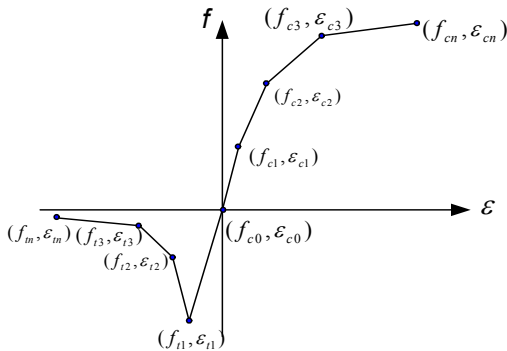


Fig. 10 Total strain crack 모델의 인장 및 압축거동

재료모델은 응력-변형률(stress-strain)관계로 압축부의 거동과 전단 및 인장부의 거동을 동시에 표현할 수 있는 Total strain crack model을 적용하였으며, Fig. 10은 압축부와 인장부에서의 인장연화(tension softening) 현상을 적절하게 구현하기 위하여 다중선형(multi-linear)방식을 적용한 것을 나타내고 있다. 또한, 콘크리트의 압축강도와 인장강도는 실험결과에서 얻은 값을 사용하였다(Table 3 참조).

전단에 대한 효과는 다음의 식(1)에서와 같이 균열이 발생한 이후 일반적으로 전단강도<sup>(4)</sup>가 감소되는 것을 고려하였으며, Fig. 11에 관계도를 나타내었다.

$$G_{re} = \beta G \quad (1)$$

여기서,  $0 \leq \beta \leq 1$

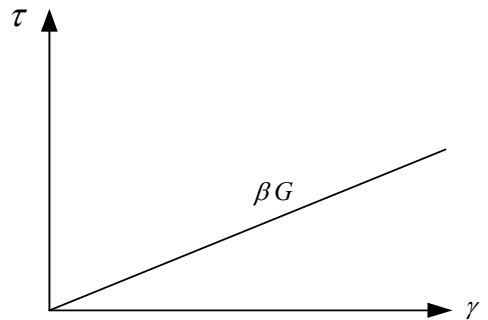


Fig. 11 total strain crack 모델의 전단효과

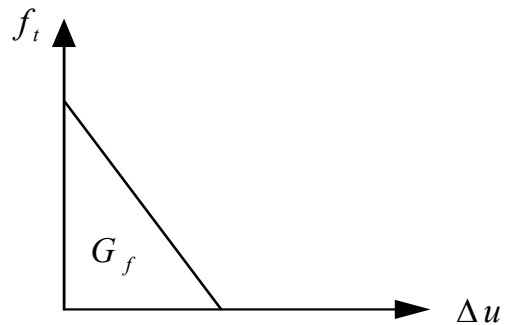


Fig. 12 건식접합부에 대한 인장-연화 거동

철근과 PS 강연선<sup>(4)</sup>의 경우 Von-Mises 항복조건을 갖는 탄소성 모델을 적용하였으며, 분절부의 접합면에 대해서는 계면요소(interface element)를 사용하였다. 접합부에 에폭시를 도포하였을 경우 응력과 상대변위에 파괴에너지( $G_f$ )값을 취성적으로 또는 선형 및 비선형과 다중선형관계로 인장연화(tension softening) 현상을 표현 할 수 있으나, 본 논문에서는 응력과 상대변위에 대한 파괴에너지값을 위의 Fig. 12과 같이 선형관계로 나타내었다.

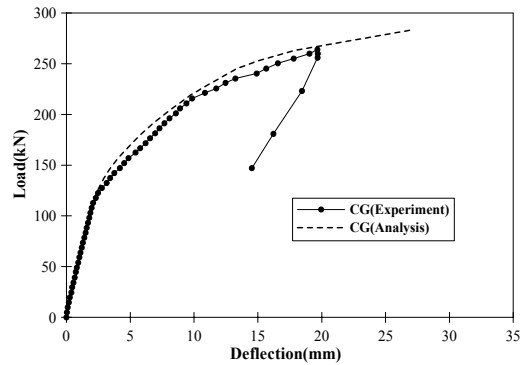
또한, 본 실험체의 경우 수순분절에 대한 영향을 파악하기 위해 건식접합부를 구성하였기 때문에 에폭시에 대한 효과가 전혀 발생하지 않으므로 본드-슬립 모델의 파괴에너지( $G_f$ )값을 0에 근사하도록 적용하여 건식접합부의 거동을 모사하였다.

## 4.2 해석결과

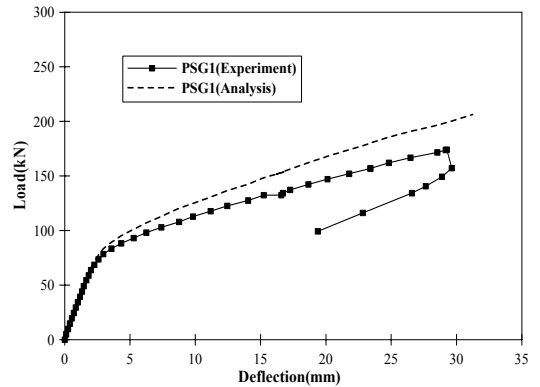
본 논문에서는 위의 Fig. 7에서 나타낸 바와 같이 실험체에 대한 실험결과를 도시하였다. 위의 실험결과와 비교하기 위하여 2차원 비선형 유한요소해석을 수행하였으며, 그 해석결과를 Fig. 13에 나타내었다. 구조물의 기하학적인 비선형성과 재료의 비탄성 항복을 고려한 비선형 해석의 비선형 수치해석기법으로 일반적으로 사용하는 방법은 단순증분법<sup>(5)</sup>이다. 이 방법은 해석기법이 가장 간단하고 직접적인 비선형 수치해석 기법으로, 개념과 적용부분에서 간단 할 뿐만 아니라 수치적 해가 발산할 우려가 없으나, 최대하중 이후의 거동에 대해서는 추적이 불가능하다는 단점이 있다. 그러나 본 논문에서 실험체의 실험결과에서 보듯 최대하중에 대해서 해석결과를 비교하기에는 단순증분법으로도 충분하기에 위의 방법으로 해석을 수행하였다.

위의 해석결과에서 보듯 프리캐스트 세그먼트 I형 거더의 2차원 비선형해석에서는 초기강성 부분과 부재에 가력한 최대하중까지의 하중-처짐관계를 적절히 모사하고 있으나, 일반적으로 해석결과가 실험결과에 비해 크게 평가되었다.

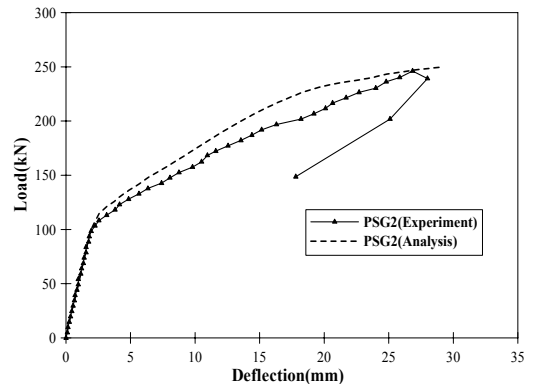
본 논문에서는 제한된 범위내에서 수행하게 된 실험 및 2차원 비선형해석의 결과를 정리하면 다음과 같이 요약 할 수 있다.



(a) CG실험체의 하중-변위 관계



(b) PSG1실험체의 하중-변위 관계



(c) PSG2실험체의 하중-변위 관계

Fig. 13 각 실험체의 하중-변위 관계

## 5. 결론

본 논문에서는 일체형 거더(CG)와 분절형 거더

(PSG1, PSG2)의 거동 양상을 실험적으로 분석하고 분절형 거더의 휨성능 및 거동을 파악하였으며, 실험 결과와 비교하기 위하여 2차원 비선형 유한요소해석을 수행하였다. 위에서 얻은 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 일체형(CG)의 경우 전 단면이 외력에 대해 효과적으로 저항하면서 지간 중앙에서 발생한 휨균열이 진행되어 휨파괴 거동을 하는데 반해 분절형(PSG1, PSG2)의 경우 주로 바닥판과 강연선이 외력에 저항하기 때문에 강연선의 항복과 동시에 극한 상태로 치닫는 거동을 나타냈다.
- 2) 분절형거더(PSG1)에 비해 긴장력을 추가로 도입한 분절형거더(PSG2)는 초기하중 상태인 선형 탄성 구간에서 일체형 실험체의 처짐과 3%의 차이로 처짐량을 근접시킬 수 있었다. 또한, 분절부의 이격거리를 분절형 실험체에 비하여 70%이상 줄일 수 있었다.
- 3) 분절형(PSG2)은 다른 분절형(PSG1)과 비슷한 거동을 보였지만 추가된 긴장재의 배치로 실험체의 극한강도를 분절형 실험체에 비해 40%정도 향상시킬 수 있었다.
- 4) 분절형 실험체(PSG1, PSG2)는 분절부라는 불연속면의 존재로 일체형(CG)에 비해 외부하중에 대하여 바닥판과 긴장재가 저항하는 것으로 나타났다. 특히, 분절형의 초기균열이 분절부의 상단에 위치한 바닥판에서 시작하는 것으로 보아서 바닥판의 강성을 높이고 허용 범위 내에서 추가로 긴장재를 투입한다면 사용 하중상태에서도 일체형과 분절형의 거동 차이를 최소화 할 수 있을 것으로 판단된다.
- 5) 콘크리트와 철근 및 강연선의 재료적 비선형성을 고려하여 수행된 2차원 비선형 유한요소해석 결과는 부재의 초기강성부분을 적절히 모사하고 있으나, 이후 하중에 대해서는 부재를 과대평가하는 것으로 나타났다.

본 논문에서는 프리캐스트 세그먼트 PSC-I형 거더에 대한 실험과 해석을 수행하였다. 제한된 범위내에서 수행된 해석결과는 어느정도 신뢰할 수 있는 결과를 도출하였으며, 추가적인 연구를 통해 분절부의 개

수와 위치 등에 따른 설계자를 위한 초기강성부분에 대한 평가를 제안할 필요가 있다.

#### 감사의 글

이 논문은 2007년도 성균관대학교 Post-Doc. 연구 지원에 의하여 연구되었습니다.

#### 참고문헌

1. 심종성, "국내 지방 규정에 적합한 Bulb-Tee 거더의 사용가능성에 대한 연구", 연구보고서, 한양대학교 공학기술연구소, 1999, pp. 46-47.
2. 김현호, "IPC거더교의 분절화에 관한 연구", 아주대학교 석사학위논문, 2002.
3. 김광수, "건식접합부를 갖는 Multi Spliced 주형의 거동에 관한 실험적 연구", 한국콘크리트학회 논문집, Vol. 17, No. 2, April 2005, pp. 229-236.
4. 박상렬, 김창훈 "외부 긴장재를 갖는 철근 콘크리트 보의 비선형 휨거동 해석모델", 대한토목학회논문집, 제25권, 제2A호, 2005, pp. 355-363.
5. 김병현, 윤영목 "선진수치해석기법을 이용한 평면 강골조 구조물의 개선소성인해석", 대한토목학회논문집, 제25권, 제2A호, 2005, pp. 307-317.
6. 오병환, "세그멘탈 PC 교량의 전단기 형상에 관한 실험적 연구", 대한토목학회논문집, 제16권, 제1-6호, 1996. pp. 725-734.
7. Rabbat, B. G., "Testing of Segmental Concrete Girders With External Tendons," PCI Journal, Vol. 32, No. 2, Mar.-Apr. 1987, pp. 86-107.
8. Fitzgerald, J. B., "Spliced Bulb-Tee Girders Bring Strength and Grace to Pueblo's Main Street Viaduct," PCI Journal, Vol. 41, No. 6, Nov.-Dec, 1996, pp. 40-54.
9. Caroland, W. B., "Spliced Segmental Prestressed Concrete I-Beams for shelby Creek Bridge," PCI Journal, Vol. 37, No. 5, Sep-Oct, 1992, pp. 22-33.
10. Maher K. Tadros, "State of the Art of Precast/Prestressed Concrete Spliced I-Girder Bridges" PCI committee on Bridges, 1995. pp. 3-23.

(접수일자 : 2006년 11월 13일)