

습식접합부를 갖는 프리캐스트 세그먼트 PSC-I형 거더의 2차원 비선형해석

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

김 광 수* 홍 성 남** 한 경 봉*** 박 선 규****
Kim, Kwang-Soo Hong, Sung-Nam Han, Kyoung-Bong Park, Sun-Kyu

Abstract

The purpose of this study is to evaluate the characteristics of the structural behavior in precast segmental prestressed concrete girders, which consist of five precast segments. These girders were developed to save labor and cost in construction field reducing a term of work. Therefore, four different types of specimens of 25m in length were built, and they were tested and analyzed for observing flexural behavior. The analysis included the investigation of the flexural behaviors in varying tendon amount and at joints using the relationship between moment and deflection. Moreover, nonlinear finite element analysis was utilized to verify the experimental result.

요 지

본 연구의 목적은 건설현장에서 노무비와 공사비를 절감하기 위하여 5개의 프리캐스트 세그먼트로 구성된 프리스트레스트 콘크리트 거더를 제작하여 그 역학적인 거동 특성을 평가하는데 있다. 본 연구를 위하여 총 4개의 25m 실험체를 동일 단면으로 제작하였으며, 모멘트-처짐 곡선으로 텐던변화와 접합부에 대한 분석과 해석을 수행하였다. 또한, 실험결과를 검증하기 위하여 2차원 비선형유한요소해석을 수행하였으며, 해석결과는 실험체의 모멘트-처짐곡선을 비교적 잘 예측하였다.

Keywords : Precast, Segment, Spliced girder, Nonlinear analysis

핵심 용어 : 프리캐스트, 세그먼트, 분절거더, 비선형해석

* 정희원, 성균관대학교 과학기술연구소 책임연구원, 공학박사

** 정희원, 성균관대학교 건설환경시스템공학과 박사과정

*** 정희원, 성균관대학교 건설환경시스템공학과 BK21연구원

**** 정희원, 성균관대학교 건설환경시스템공학과 교수

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

•본 논문에 대한 토의를 2007년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 2008년 3월호에 토론결과를 게재하겠습니다

1. 서론

프리스트레스트 콘크리트(이하, PSC) 거더교는 교량공학 분야에서 흥미롭고 중요한 업적중에 하나이다. 공법면에서도 현장에서 타설하여 시공하는 방식과 프리캐스트 부재로 제작하여 시공하는 방식 등 다양한 시공공법이 있으며, 단면의 형태도 I형 단면에서 상자형 단면에 이르기까지 종류도 다양하며, 단면의 최적화와 표준화가 상당부분 이루어지게 되었다.

국외의 경우 PBS(Prefabricated Bridges System)을 통하여 하부구조에서 상부구조 전체를 프리캐스트 부재로 제작하여 시공하는 기술이 이미 안정화 단계에 도달하였으나, 대부분이 교량의 상부구조는 상자형 단면으로 구성되어 있으며 I형 단면에 대한 시공사례는 많지 않은 실정이다.

본 논문에서는 현장 타설방식을 탈피하고 시공품질 및 교통량 우회비용을 절감하기 위하여 기존의 프리캐스트 세그먼트 공법을 상자형 단면이 아닌 I형 단면에 적용하였다. 이와 관련된 국내의 연구현황을 살펴보면, 단면의 치수를 변화시켜 단면성능이 향상된 Bulb-Tee 단면 및 접합시공공법을 이용한 장시간화에 대한 연구⁽¹⁾가 수행되었으며, 다단계 긴장방식이 도입된 프리스트레스트 콘크리트 I형 거더교의 분절화에 대한 연구⁽²⁾가 수행되었다. 또한, 프리캐스트 세그먼트 프리스트레스트 콘크리트 거더교에 대한 축소모형실험을 통해 거더교의 분절화에 대한 연구⁽³⁾가 이루어지는 등 국내에서도 활발한 연구가 진행되고 있는 실정이다.

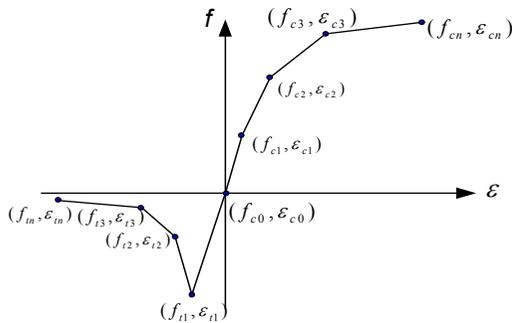


Fig. 1 total strain crack 모델의 압축 및 인장거동

국외의 경우 프리캐스트거더에 대한 실험⁽¹⁶⁾이 수행되었으며, 프리캐스트로 제작된 Bulb-Tee 거더에 관한 파괴실험⁽¹⁷⁾도 진행되었다.

해석적인 측면에서는 계면의 부착파괴에 대한 실험을 통해 점착력과 내부마찰각의 관계를 도출하고 거동을 규명할 수 있는 유한요소해석 프로그램을 개발⁽⁴⁾하였고 쉘요소와 보요소를 변형한 매크로요소를 정식화한 PSC박스거더 교량을 해석⁽⁵⁾ 하였으며, 이와같은 연구는 국외에서도 활발히 수행된 바 있다. 따라서, 본 논문에서는 이와같은 연구의 일환으로 실험크기의 실험체를 통한 구조적 거동의 특성을 분석하고 해석기법을 제안하고자 한다.

2. 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. 해당 실험체를 모델링하기 이전에 각 요소에 대한 요소테스트를 실시하고 전체모델링을 수행하였다.

2.1 콘크리트 재료모델

유한요소해석에 적용된 콘크리트의 재료모델은 응력-변형률(stress-strain)관계로 압축부의 거동과 전단 및 인장부의 거동을 동시에 표현 할 수 있는 Total strain crack model⁽¹⁰⁾을 적용하였으며, Fig. 1은 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(Fig. 2 및 Fig. 3 참조).

전단에 대한 효과는 다음의 식(1)에서와 같이 균열이 발생한 이후 일반적으로 전단강도가 감소되는 것을 고려하였다.

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

여기서, $0 \leq \beta \leq 1$

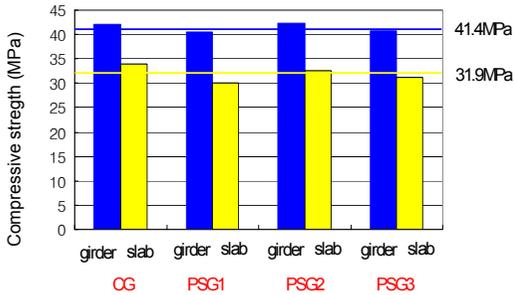


Fig. 2 실험체의 압축강도 시험결과

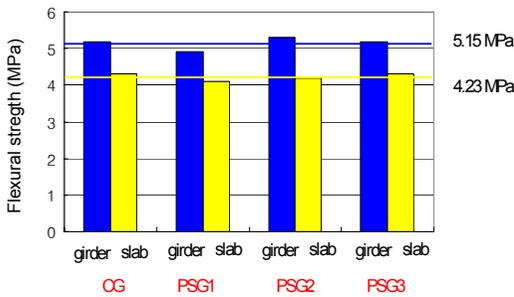


Fig. 3 실험체의 휨인장강도 시험결과

2.2 철근의 재료모델

철근의 응력-변형률 관계가 탄성영역에 있는 경우에는 철근만의 구성모델을 적용하면 되지만 균열면에서 철근이 최초로 항복하게 되면 철근의 평균응력-평균변형률 관계는 더 이상 탄성관계에 있지 못하게 되며, 이 때 철근의 평균응력은 항복응력 보다 작게 된다.⁽¹¹⁾ 균열부분을 제외하면 철근의 응력은 항복응력 보다 작기 때문에 철근만의 응력-변형률 관계에서 볼 수 있는 항복고원 현상은 나타나지 않게 되며 즉시 변형률 경화현상을 보이게 된다. 따라서, 콘크리트 속에 묻혀 있는 철근의 항복 후 거동을 다음의 식(2)와 같이 나타냄으로써 위의 효과를 반영하도록 bilinear 모델⁽⁸⁾을 적용하였다.

$$f_s = f_{sy} + E_{sh}(\epsilon_s - \epsilon_{sy}) \quad (2)$$

여기서, f_s 는 철근의 평균응력, ϵ_s 는 철근의 평균 변형률, f_{sy} 는 철근의 변형률 경화 시점에서의 평균응

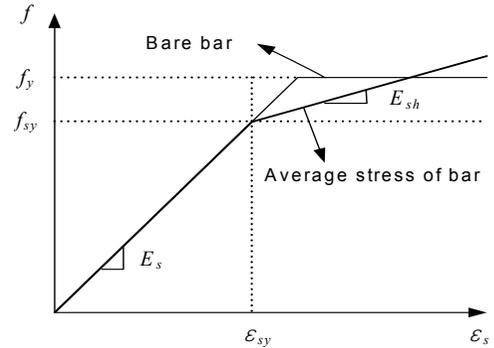


Fig. 4 철근콘크리트 부재의 항복거동

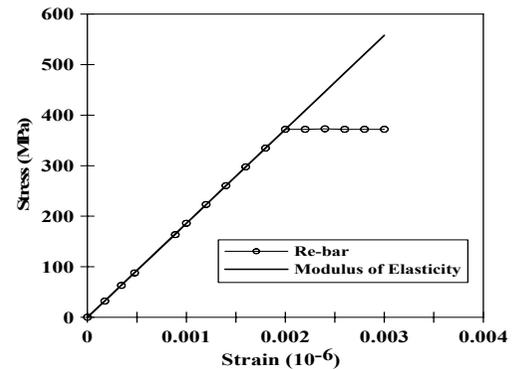


Fig. 5 사용철근의 응력-변형률 곡선

력, ϵ_{sy} 는 철근의 변형률 경화 시점에 대응하는 철근의 평균변형률, E_{sh} 는 철근의 변형률 경화율을 나타내며, 이를 Fig. 4에 나타내었다.

철근의 응력-변형률 곡선으로부터 철근의 탄성계수를 측정하고자 총 3개의 시편을 제작하여 실험을 수행하였으며, 측정된 응력-변형률 곡선에서 항복강도의 85% 범위 내의 데이터를 회귀분석하여 철근의 탄성계수를 산정하였다. 즉 Fig. 5에 나타난 바와 같이 항복강도는 368.8MPa, 탄성계수는 1.86×10^5 MPa으로 구하였다.

2.3 PS 강연선의 재료모델

콘크리트에 매입된 PS 강연선의 응력-변형률의 관계는 콘크리트와 PS 강연선의 부착효과로 인하여 PS 강연선만의 응력-변형률과는 다른 거동을 보이게 된다.

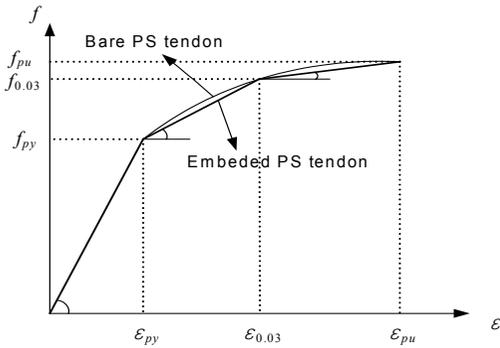


Fig. 6 PS텐던의 항복거동

이러한 부착효과에 대한 많은 연구⁽¹²⁾가 선행되었으며, 이와같은 부착효과를 해석에 고려하기 위하여 embedded된 PS 강연선의 항복조건을 다음의 Fig. 6 과 같이 trilinear의 형태로 고려하였다.⁽⁶⁾

2.4 접합부의 계면요소

각각의 세그먼트와 세그먼트 사이의 접합부에 존재하는 불연속적인 상태를 고려하기 위하여 사용된 계면(interface) 요소는 Fig. 7에 나타난 바와 같이 콘크리트의 4절점 평면응력(plain stress) 요소를 고려하기 위하여 2절점 선요소(line-element)로 모델링하였다. 이 요소는 다음의 식(3)에 나타난 파괴기준을 초과할 경우 계면요소(interfacial element)가 모재인 콘크리트에서 떨어지도록 고려하였다.

$$\tau + f \tan \phi \geq C \quad (3)$$

여기서, τ 와 f 는 전단응력과 수직응력을 나타내고 있으며, ϕ 는 내부마찰각 그리고 C 는 점착력을 나타낸다.

위의 전단응력과 수직응력은 사전단 부착실험을 통하여 산정해야 하나, 본 해석에서는 기존의 연구결과를 이용하였다. Ziraba(1993)는 실험결과 바탕으로 부착과피 하중시의 점착력이 4.8MPa과 9.6MPa 사이에 분포하며 내부마찰각을 28°로 제한⁽¹³⁾하였으며, 또한 Jones(1982)는 실험결과를 분석하여 점착력을 제안하였고 그 값은 5.4MPa로 제안⁽¹⁴⁾하였다. 또 다른 연구자(Arduimi, 1997)는 점착력을 5.0MPa, 내

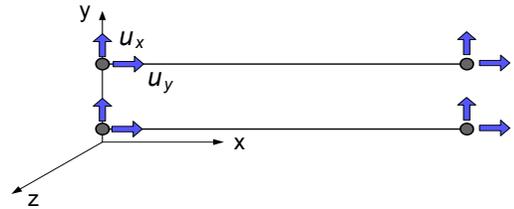


Fig. 7 L8IF 계면요소

부마찰각은 59°로 제시⁽¹⁵⁾한 바 있다. 본 해석에서는 점착력의 상한값과 하한값을 6.1MPa과 4.7MPa로 제한하고 내부마찰각을 47°로 제한한 값을 적용⁽⁴⁾하였다.

2.5 시공단계 해석

해석 대상 실험체는 프리캐스트 세그먼트로 제작된 프리스트레스트 콘크리트 I형 거더와 연속된 강재 거푸집에 의해 제작된 프리스트레스트 콘크리트 I형 거더이다. 실험체를 제작하는 단계별 하중과 경계조건이 변화하기 때문에 이러한 효과를 해석에 반영하기 위하여 시공단계별 해석(phase analysis)을 수행하였다. 해석을 수행하는 1차 단계는 I형(바닥판 제외) 거더를 제작하고 1차 프리스트레스트력을 도입하는 단계이다. 이 단계에서는 작용하는 하중은 거더의 자중과 1차 프리스트레스트력이며, 위의 하중에 대한 부재의 저항강성은 바닥판이 제외된 I형 단면의 강성으로 지지하게 된다. 또한, 시공단계별로 바닥판이 타설되어도 1차 해석단계에서 적용된 부재의 강성으로 지지하게 되므로 바닥판 하중도 1차 해석단계에 포함시켰다. 2차 해석 단계에서는 바닥판이 소정의 양생기간을 거쳐 I형 거더와 바닥판이 합성형으로 거동하는 단계를 말하며, 이 단계에서 2차 프리스트레스트력이 도입된다. 마지막 3차 해석 단계에서는 2차 해석 단계에서의 강성으로 하중재하를 지지하는 단계이다. 이와같은 일련의 단계별 해석의 과정을 다음의 Fig. 8에 나타내었다.

다음의 Fig. 9는 일체형 실험체(CG)와 분절형 실험체(PSG1~PSG3)에 대한 전체모델링을 나타내고 있다. 일체형의 경우 3,765개의 절점과 3,500개의 요소로 모델링 하였으며, 분절형(PSG1~PSG3)의 경우 4,301개의 절점과 4,062개의 요소로 모델링을 하였다.

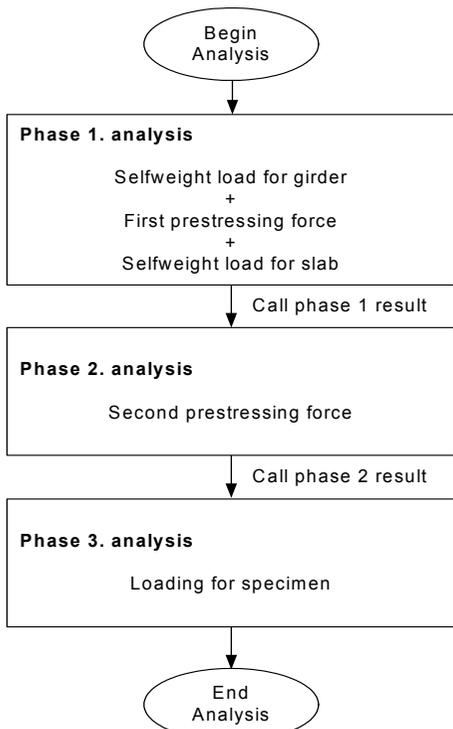
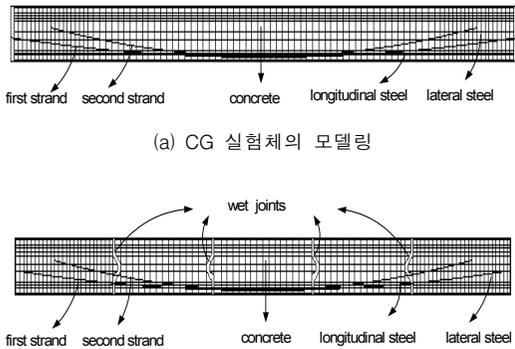


Fig. 8 시공단계별 해석의 흐름도



(a) CG 실험체의 모델링

(b) PSG1, PSG2 그리고 PSG3 실험체의 모델링

Fig. 9 CG, PSG1, PSG2 그리고 PSG3 실험체의 모델링

3. 실험

3.1 실험개요

본 실험에서는 일체형 거더와 분절형 거더의 거동

차이를 분석하기 위하여 4본의 실험체를 제작하여 실험을 수행하였다. 실험체는 4가지로 구분 제작하였으며, 하나는 일체형 실험체(CG)로 제작하고 두번째는 일체형 거더와 동일한 단면과 긴장력을 가지고 5개의 세그먼트로 구성된 분절형 실험체(PSG1)로 제작하였으며, 나머지 두 개는 단면의 형태는 같으나 추가 긴장력을 도입한 분절형 실험체(PSG2, PSG3)로 제작하였다. 위에서 언급된 4개의 실험체는 지간장 25m의 왕복4차로 교량에 적용 가능한 설계등급 2등급의 외측거더로 제작하였으며, 분절형(PSG1~PSG3) 실험체의 경우 각각의 세그먼트를 5,000mm씩 분할 제작 하였다.

3.2 실험 계획 및 제작

본 연구에서는 실물 크기의 25m 실험체 4개를 제작하였으며, 실험체별 긴장재의 양과 긴장력을 Table 1에 요약하였다.

분절형 실험체의 경우에는 1차 긴장시 접합부에 에폭시를 도포하여 각 세그먼트를 일체화 하였으며, 바닥판 이외의 추가 고정하중은 재하 하중에 포함되는 것으로 보고 실험을 수행하였다.

실험체의 재료적 설계 물성치는 거더의 경우 콘크리트 압축강도는 40MPa, 바닥판의 경우 30MPa를 사용하였으며, 철근의 경우 항복강도 300MPa를 사용하였다. 강연선의 경우 다음의 Table 2에 요약하였으며, 에폭시의 재료 물성치는 Table 3에 나타내었다. 또한, 콘크리트의 건조수축으로 인한 균열 등의 문제점을 피하고 조기강도 발현을 위해 시방서 규정대로 증기양생을 실시하였다.

Table 1 실험체별 텐던수 및 긴장력

Specimens	Length(mm)	Tendons (EA)		Jacking force (kN)
		first	second	
CG	25,000	18	6	3,834
PSG1	5,000@5	18	6	3,834
PSG2	5,000@5	18	10	4,474
PSG3	5,000@5	18	14	5,113

Table 2 PS 텐던의 물성치

Type	Strand diameter (mm)	Area (mm ²)	Tensile strength (kN)	Elongation (%)
SWPC 7B	12.7	98.71	183.26	3.5이상

Table 3 에폭시의 물성치

Division	Strength (MPa)	Standard	Note
compression(3days)	77.0	ASTM-C-190	specific gravity = 1.8 mix ratio = 25:6 hardening time = 24 hours
compression(7days)	80.0		
tensile(3days)	14.4		
tensile(7days)	18.0		
flexural(3days)	37.0		
flexural(7days)	40.0		
shear(3days)	10.0		
shear(7days)	14.0		

세그먼트 교량에서 전단기는 필수적으로 사용되기 때문에 전단기에 대한 설계가 매우 중요하다. 국내외에서 발표된 전단기의 돌출비 및 경사각(θ)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.⁽⁷⁾

3.3 재하 및 측정방법

재하실험은 단경간 단순지지 조건하에서 수행하였다. 거더 중앙과 중앙에서 양쪽으로 5,000mm씩 간격을 두고 각 지점에 1,000kN용량의 유압실린더 3개를 사용하여 하중제어 방식으로 3점 하중재하 실험을 수행하였다. 재하실험시 실험체의 정확한 거동을 측정하고 해석을 수행하기 위해서는 거더 각 단면의 응력 및 변형률과 처짐 등의 데이터를 정확하게 측정하여야 한다. 따라서, 본 실험에서는 실험체의 처짐과 분절부의 벌어지는 정도를 알아보기 위하여 변위계(LVDT)를 설치하였다. 변위계(LVDT)의 설치 위치와 하중프레임(loading frame)은 Fig. 10에 나타내었으며, 실험전경을 Fig. 11에 나타내었다.

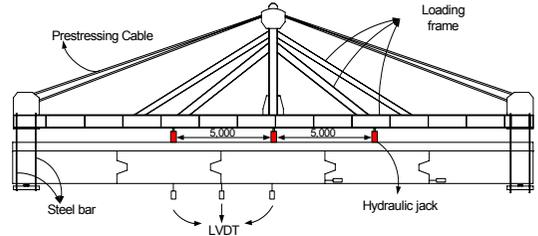


Fig. 10 LVDT 위치 및 하중재하도



Fig. 11 취재하실험 전경

철근이 받는 응력을 측정하기 위하여 인장철근, 전단철근 및 바닥판 주철근 등에 철근 변형률게이지를 부착하였다. 또한, 콘크리트 단면의 변형의 정도를 측정하기 위하여 지간중앙부와 전단기 부분에 콘크리트 변형률게이지를 부착하였으며, 부착위치는 Fig. 12와 Fig. 13에 각각 나타내었다.

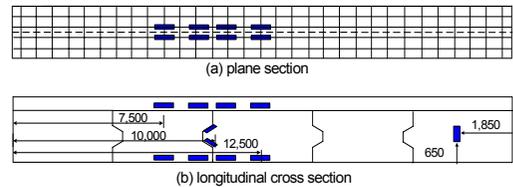


Fig. 12 철근게이지 부착위치

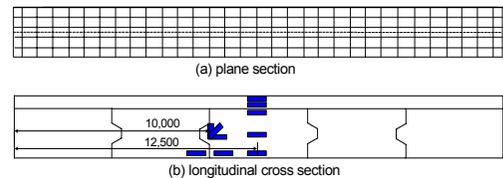


Fig. 13 콘크리트게이지 부착위치

4. 실험결과 및 분석

4.1 균열 및 파괴 양상

일체형 실험체(CG)는 전형적인 휨균열 양상을 나타내었다. 초기 균열은 $2,488\text{kN}\cdot\text{m}$ 에서 실험체 중앙 하단부분에서 발생했으며, 하중이 점차 증가 할수록 균열이 진전되고 휨균열의 수와 균열폭이 증가하는 일반적인 휨균열 양상을 나타내었다. 분절형 실험체(PSG1)의 경우 $2,475\text{kN}\cdot\text{m}$ 를 전후해서 이격거리가 급격히 증가하기 시작하였고 초기 균열은 $2,337\text{kN}\cdot\text{m}$ 에서 실험체 중앙 하단에서 다수가 발생하기 시작하였다. 하중이 증가할수록 균열은 일체형(CG)과 비슷하게 휨 균열의 수와 균열폭이 증가하면서 실험체 상부 플랜지까지 진전되었다. 분절형 실험체(PSG2, PSG3)의 경우는 초기 균열이 실험체 중앙 하단부에서 다수가 발생하였다. 그리고, 하중이 증가할수록 균열은 휨 균열의 수와 균열폭이 증가했지만, 다른 분절형 실험체(PSG1) 보다는 균열의 수나 균열의 깊이에 대한 진전이 감소한 것을 나타내었다. 분절형 실험체에서 가장 취약한 부분으로 생각되는 전단기의 균열현상은 일체형과 거의 동일하고, 전단기로 인하여 발생한 문제는 관찰되지 않았다. Fig. 14에 각 실험체의 균열도를 나타내었다.

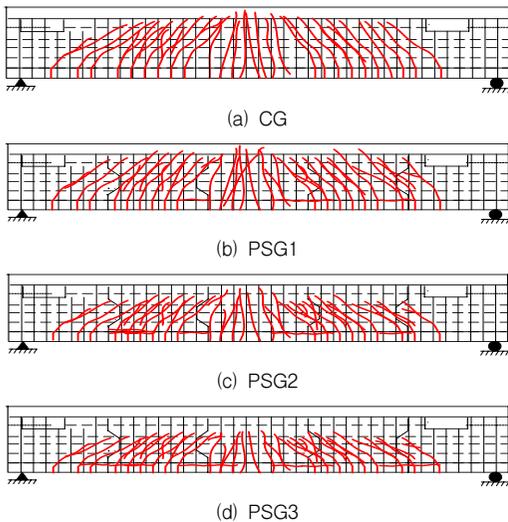


Fig. 14 실험체별 균열도

4.2 모멘트-처짐관계

각 실험체 중앙 지점에서의 모멘트-처짐 곡선은 Fig. 15에 나타냈고, Table 4에 이론값과 측정값을 비교한 것을 나타내었다.

일체형 실험체(CG)는 약 $2,475\text{kN}\cdot\text{m}$ 근처에서 모멘트-처짐 곡선에 변화가 있는데, 이는 균열의 발생에 의한 것으로 판단되며, 외관상으로는 $2,488\text{kN}\cdot\text{m}$ 모멘트에서 실험체의 중앙하부 플랜지에 육안상으로 첫 균열이 관측되었다. 이론해석에 의한 균열모멘트는 철근을 고려하면 $2,260\text{kN}\cdot\text{m}$ 정도이므로 측정값과 이론값이 상당히 유사한 것으로 나타났으며, 이러한 현상은 균열하중이 충분히 크기 때문에 사용하중 상태에서 균열이 발생하지 않은 것을 알 수 있다.

설계하중(DB-18)에 해당하는 처짐을 계산하기 위하여 설계조건에 맞도록 해석을 수행하였다. 여기서, 바닥판은 셸(Shell)요소를 사용하고 거더는 프레임(Frame)요소를 사용하였으며, 중립축 차이는 강절요소(Rigid element)를 사용하여 모델링을 구성하였다. 고정하중과 활하중(충격미포함)에 대한 외측거더의 최대모멘트는 $1,575\text{kN}\cdot\text{m}$ (2차선재하)이며, 이때 발생하는 외측거더의 처짐량은 15.05mm 가 발생하였다. 실험에서 구한 설계하중에 대한 처짐량은 14.87mm 이므로 이론치와 실험치가 서로 근사한 값으로 나타났다.

분절형 실험체(PSG2)는 외관상으로는 실험체의 중앙 하부 플랜지에 약 $3,437\text{kN}\cdot\text{m}$ 에서 육안상으로

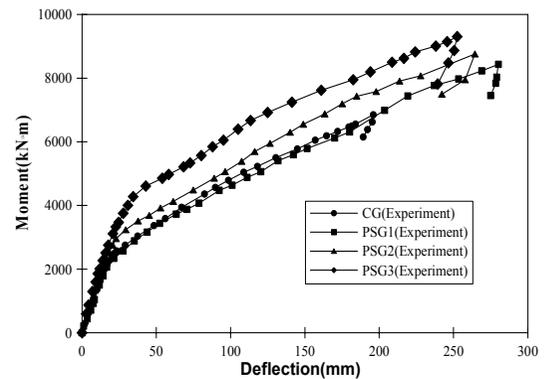


Fig. 15 실험체의 모멘트-처짐관계

Table 4 실험체별 결과

Specimens	Loading stages	Moment (kN · m)	Deflection (mm)		Deflection ratio (%)
			Theory	Test	
CG	DB-18	1,575	15.5	11.2	28
	cracking	2260	23.6	18.3	23
	yielding	4867	116.1	99.1	15
PSG1	DB-18	1,575	15.5	11.7	25
	cracking	2260	23.6	18.4	22
	yielding	4867	116.1	106.1	9
PSG2	DB-18	1,575	15.4	9.7	37
	cracking	2750	28.4	20.7	27
	yielding	5930	134.9	126.0	7
PSG3	DB-18	1,575	15.2	8.0	47
	cracking	3226	32.9	21.9	33
	yielding	7062	153.5	132.8	14

첫 균열이 관찰 되었으며, 약 2,956kN · m 근처에서 모멘트-처짐 곡선에 변화가 있었다.

이론해석에 의한 균열모멘트는 2,750kN · m 정도 이므로 이론값에 비해 측정값이 약 7% 정도 높게 측정되었다. 설계하중(DB-18) 작용시 이론적인 처짐은 약 15.4mm인데 비하여 실제 처짐은 9.7mm로서 약 37%정도 낮게 측정되었다. 이는 일체형(CG)과 분절형 실험체(PSG1)에 비해 증가된 2차 긴장력 때문인 것으로 판단된다.

분절형 실험체(PSG3)는 약 4,273kN · m 근처에서 모멘트-처짐 곡선에 변화 있었다. 외관상으로는 거더의 중앙하부 플랜지에 약 4,675kN · m에서 육안상으로 첫 균열이 관찰 되었다. 이론해석에 의한 균열모멘트는 3,226kN · m 정도이므로 이론값에 비해 측정값이 약 45% 정도 높게 측정되었다. 측정값과 이론값이 상당한 차이가 나타나는데, 이는 높은 긴장력에 기인한 것으로 판단된다.

일체형(CG) 및 분절형 실험체(PSG1~PSG3)의 설계하중 및 균열모멘트 작용시 측정처짐은 이론값에 비해 작게 측정되었고, 설계하중(DB-18) 및 균열모멘트 작용시의 처짐 값 모두 설계기준의 활하중 처짐 기준 $L/800 (=31.25\text{mm})$ 보다 작음으로써 사용성을 충분히 확보하고 있음을 알 수 있다. 일체형(CG) 및 분절형 실험체(PSG1~PSG3)의 재하실험은 최대 재하모멘트 6,847kN · m에서 9,272kN · m까지 재하

하였으며, 이때 하중 재하점의 슬래브는 압축과파 징후를 보이지 않았다.

실험결과에서 보듯이 PSI 거더가 설계하중의 약 5배 정도로 내하력을 갖고 있는 것으로 나타났으며, 최대 재하모멘트에 도달할 때까지의 처짐이 280mm까지 도달하는 것으로 보아 충분한 연성을 확보하고 있는 것으로 나타났다.

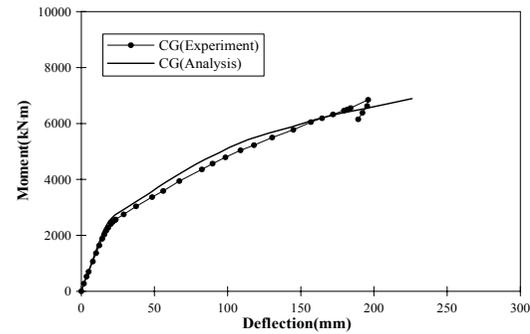
4.3 해석결과

본 논문에서는 위의 Fig. 15에서 나타낸 바와 같이 실험체에 대한 실험결과를 도시하였다. 위의 실험결과와 비교하기 위하여 2차원 비선형 유한요소해석을 수행하였으며, 그 해석결과를 Fig. 16에 나타내었다.

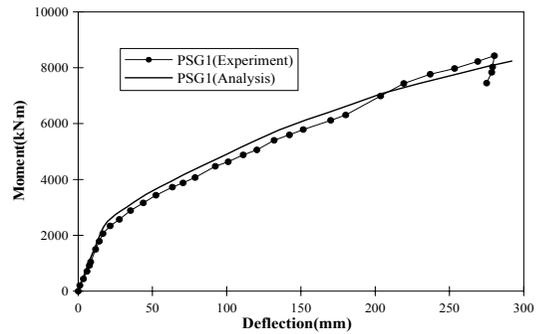
본 논문에서 실험체의 실험결과에서 보듯 최대하중에 대해서 해석결과를 비교하기에는 단순증분법으로도 충분하기에 위의 방법으로 해석을 수행하였다.

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.

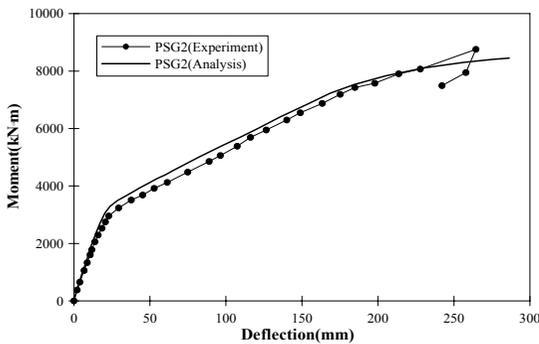
본 논문에서는 제한된 범위내에서 수행하게 된 실험결과 및 2차원 비선형해석의 결과를 정리하면 다음과 같이 요약 할 수 있다.



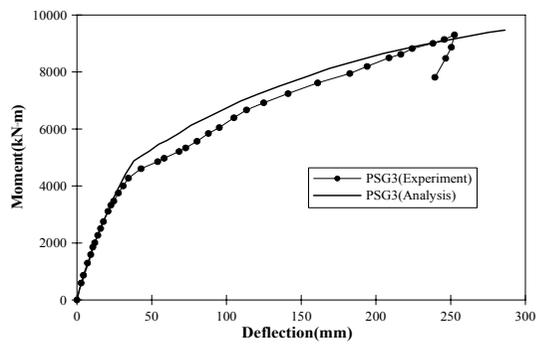
(a) 모멘트-처짐관계(CG)



(b) 모멘트-처짐관계(PSG1)



(c) 모멘트-처짐관계(PSG2)



(d) 모멘트-처짐관계(PSG3)

Fig. 16 실험체별 해석결과

5. 결론

본 논문에서는 일체형 실험체(CG)와 분절형 실험체(PSG1~PSG3)의 거동 양상을 실험적으로 분석하고 분절형 거더의 휨성능 및 거동을 파악하였으며, 실험결과와 비교하기 위하여 2차원 비선형 유한요소해석을 수행하였다. 위에서 얻은 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 일체형 실험체의 경우 전 단면이 인장철근과 강연선이 외력에 대해 효과적으로 저항하면서 시간 중앙에서 발생한 휨균열이 진행되어 휨과괴 거동을 나타내었다. 분절형 실험체는 주로 바닥판과 강연선이 외력에 저항하기 때문에 강연선의 항복과 동시에 극한 상태로 치닫는 거동을 예상하였지만 분절부의 에폭시 도포로 인하여 일체형 실험체와 긴장량이 같은 분절형 실험체(PSG1)는 일체형 실험

체(CG)와 거의 같은 거동양상을 나타냈고, 간접적으로 에폭시의 효과를 알 수가 있었다.

- 2) PSI 거더의 파괴 양상은, 모든 실험체가 휨과괴되는 파괴형상을 나타냈다. 초기 균열은 설계하중의 1.5배 이상에서 각각 관측되었다. 따라서 설계하중에 의한 휨균열의 발생의 가능성은 매우 낮은 것으로 나타났다.
- 3) 설계하중 작용시 실험체 모두 이론처짐에 비해 측정처짐이 낮게 나타났고, 처짐값은 시방서에 제안된 처짐 제한 규정을 충분히 만족하는 것으로 나타났다. 따라서, PSI 거더가 설계하중 처짐에 저항하기에 충분한 강성을 갖고 있는 것으로 판단된다.
- 4) 콘크리트와 철근 및 강연선의 재료적 비선형성을 고려하여 수행된 2차원 비선형 유한요소해석 결과는 부재의 초기강성부분을 적절히 모사하고 있으나, 이후 하중에 대해서는 부재를 과대평가하는 것

으로 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 본절부의 개수와 위치 등에 따른 설계자를 위한 초기강성부분에 대한 평가를 제안할 필요가 있다.

감사의 글

“이 논문은 2007년도 성균관대학교 Post-Doc. 연구지원에 의하여 연구되었음.”

참고문헌

1. 심종성, “국내 시방 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, “건설적합부를 갖는 Multi Spliced 주형의 거동에 관한 실험적 연구”, 한국콘크리트학회 논문집, Vol. 17, No. 2, April 2005, pp. 229-236.
4. 박윤제, “강관으로 보강된 철근콘크리트보의 부착과괴”, 성균관대학교 박사학위논문, 1999.
5. 오병환, “PC 박스거더 교량의 시공단계별 비선형 해석 및 후처리 기법”, 한국콘크리트학회 논문집, Vol. 6, No. 2, 1994, pp. 368-373.
6. 박재근, “텐던이 비부착된 프리스트레스트 콘크리트 구조물의 극한 거동 해석”, 성균관대학교, 박사학위논문, 2006.
7. 오병환, 세그멘탈 PC 교량의 전단기 형상에 관한 실험적 연구”, 대한토목학회논문집, 제16권, 제1-6호, 1996, pp. 725-734.
8. 김태훈, “비선형 유한요소해석을 이용한 철근콘크리트 교각의 내진성능 평가”, 성균관대학교, 박사학위논문,

- 2003.
9. 오병환, “세그멘탈 PC 교량의 전단기 형상에 관한 실험적 연구”, 대한토목학회논문집, 제16권, 제1-6호, pp. 725-734.
10. Okamura, H., Maekawa, K., and Sivasubramaniyam, S., “Verification of modeling for reinforced concrete finite element, Finite Element Analysis of Reinforced Structures”, Journal of Structural Engineering, ASCE, 1985.
11. Naaman, A. E., “Evaluation of the Ultimate Steel Stress in Partially Prestressed Flexural Members”, Journal of the Prestressed Concrete Institute, Vol. 30, No. 5, 1992, pp. 54-81,
12. Collins, M. P. and Mitchell, P., Prestressed Concrete Structure, Prentice Hall, 1991.
13. Zibara, Y. N., et. al., “Guideline toward the Design of Reinforced Concrete Beams with External Plates”, ACI Journal, Vol. 91, No. 6, 1994, pp. 639-646.
14. Jones, R., Swarny, R. N. and Ang, T. H., “Under and Over-reinforced Concrete Beams with Glued Steel Plates”, The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, Vol. 4, No. 1, 1982, pp. 19-32.
15. Arduini, M. and Nanni, A., “Parametric study of Beams with Externally bonded FRP Reinforcement”, ACI Structural Journal, Vol. 94, No. 5, 1997.
16. Rabbat, B. G., “Testing of Segmental Concrete Girders With External Tendons,” PCI Journal, Vol. 32, No. 2, Mar.-Apr 1987, pp. 86-107.
17. 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.

(접수일자 : 2006년 11월 13일)