



다단계 자중 프리플렉스 및 프리스트레싱 합성거더의 시공단계에 따른 휨성능 평가

최병호^{1*} · 김태봉² · 박성균³

¹교수, 한밭대학교, 건설환경공학과, ²위촉연구원, 한밭대학교, 건설안전기술연구소, ³부장, 코비코리아 교량3팀

Flexural Performance of Multistage Prestressed and Self-weight Preflex Girder

Choi, Byung Ho^{1*}, Kim, Tae Bong², Park, Sung Kyun³

¹Associate Prof, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Hanbat National University, Daejeon, 34158, Korea

²Researcher, Institute of Construction Safety Technology, Hanbat National University, Daejeon, 34158, Korea

³Specialist. Member. Bridge 3, COWI KOREA., Suwon, 16439, Korea

Abstract - This paper deals with the flexural performance of a composite girder system designed to readily form a composite section without a formwork and to easily realize multistage preflexing and prestressing. After a 3-Dimensional finite element modeling for construction stage analysis, the parametric numerical analysis was performed to analyse the stress distribution on the composite girder sections and the prestressing effects along with concrete pouring method and strand tensioning method. Based on the stress distribution analysis, a favorable construction stage model has been rationally chosen and then the ultimate flexural strengths were evaluated to conduct a comparative study, which exceed the nominal flexural strength suggested by the current design specification(ASD). It can be concluded that the proposed composite girder and fabrication procedure should have a sufficient structural performance.

Keywords - Construction stage analysis, Flexural strength, Prestressed girder, Steel composite girder, Structural performance

1. 서론

강재-콘크리트 합성거더는 콘크리트와 강재의 장점을 극대화해서 효율적으로 강성을 증가시키고 소요 단면 및 재료물량을 감소할 것으로 기대되기 때문에 교량에도 활용되어 오고 있다. 강합성거더의 제작 방법은 공장에서 분절 제작된 강재 거더를 현장에서 조립하여 거치한 후 이에 거푸집을 설치하여 콘크리트를 합성시키고 프리스트레스를 도입하는 방식이 널리 사용된다. 따라서 현장에서의 거푸집 설치, 콘크리트 타설 및 탈형, 프리스트레스(또는 프리플렉스) 재

하 등 일련의 추가적인 제작 공정을 요한다. 이로 인해, 현장 작업장의 사용 여건에 따른 소요 비용이 상승되거나 거푸집 관련 작업으로 인해 제작기간이 연장되는 등의 불가피한 문제점들이 경쟁력을 잃게 할 수도 있다. 이에 따라, 현장에서의 소요 작업을 단순화 시키는 것이 합성거더 교량의 건설비용 저감 및 시공 안전성을 제고하기 위한 중요한 개선점으로써 대두되고 있다. 이 연구에서는 현장에서의 제작 및 가설이 용이하며 위치별로 각 단위모듈 거더에 사용될 소요 재료물량, 단면강성과 긴장력 도입을 비교적 쉽게 최적화 할 수 있도록 고안된 다단계 자중 프리플렉스 및 프리스트레싱 합성거더를 대상으로 시공단계를 고려한 수치해석 모형을 수립하고 제작과정과 단계를 변수로 하는 구조 해석적 변수연구를 수행하여, 해당 기술의 효과를 정량적으로 비교 평가하고자 한다.

Note.-Discussion open until February 28, 2018. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on June 29, 2017; revised July 24, 2017; approved on July 26, 2017.

Copyright © 2017 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-42-821-1105 Fax. +82-42-821-1589

E-mail. bhchoi@hanbat.ac.kr

2. 이론적 배경 및 변수연구 방법

2.1 다단계 프리스트레싱 합성거더 기본구성

이 연구의 대상이 되는 다단계 프리스트레싱 합성거더^[1]는 거푸집겸용 절곡부재를 적용한 합성거더로써, Fig. 1과 같이 상부방향으로 상하부플랜지를 절곡하여 거푸집의 설치없이 간편하게 합성단면을 형성한다. 그 다음 절곡되어 형성된 공간부에 콘크리트를 채우고, 단순보 양단지지 조건하에서 자중 프리플렉스 및 다단계 프리스트레싱을 구현할 수 있도록 단면을 구성하였다.

다단계 프리플렉스 및 프리스트레싱 합성거더는 일반적인 기존 강합성거더의 제작단계를 보완하여 시공기간을 줄이고, 단계적 긴장력을 도입하여 높은 구조효율성을 갖도록

구성하였다. 기존 강합성거더는 제작장에서 강재를 분절하여 제작하고 현장에서 연결한 후, 강재거더에 거푸집을 설치하고 콘크리트를 타설한 다음 프리스트레싱을 도입하는 제작과정을 거친다. 이에 반면, 이 합성거더는 강재후판의 양 끝단을 상부방향으로 절곡하여 거더 플랜지용 U형 부재를 제작한 후 U형 절곡부재 내부에 철근 및 강연선을 배치한다. 그 다음 거푸집의 설치없이 간편하게 콘크리트를 타설하여 합성단면을 형성하고 구간별로 배치된 강연선에 단계적 프리스트레싱을 도입하는 제작방식을 택한 합성거더 형식이다. 이의 상세한 제작단계는 Table 1과 같다.

2.2 제작단계에 관한 변수연구

이 논문에서 다루는 합성거더는 다단계 프리스트레싱 과정으로 인하여 공용하중을 재하하기 이전에 각 부재별로 선응력이 도입되므로 제작단계 및 방식에 따라 응력분포와 단면 성능이 달라질 수 있다. 따라서 다양한 제작과정에 따라 각 부재에 발생하는 시공단계별 응력양상과 구조성능을 정량적으로 비교 평가하기 위해 아래 Table 2와 같이 4가지 경우의 변수 해석모델을 선정하였다. 선정된 해석모델은 콘크리트 타설방법과 강연선 긴장방법을 변수로 지정하였고, 이를 각기 고려한 제작단계에 관한 시공단계별 변수해석을 수행하였다.

Table 2에서 보는 바와 같이 콘크리트 타설방법은 상하부 플랜지 콘크리트를 동시에 타설하는 방법과 상부플랜지 콘크리트와 하부플랜지 콘크리트를 분리해서 타설하는 방법으로 나뉜다. 강연선 긴장방법은 중앙부에 설치된 강연선에 긴장력을 도입한 다음 전 구간에 설치된 강연선에 긴장력을 도입하는 단계긴장 방법과 전 구간에 설치된 강연선에 긴장력을 도입하는 전체긴장 방법 두 가지가 있다. 다단계 프리플렉스 및 프리스트레싱 합성거더는 하부플랜지에 설치된 강연선에 프리스트레싱을 도입함으로써, 공용하중 재하 이전에 각 부위별로 적정량의 선응력이 도입된다. 따라서 합성거

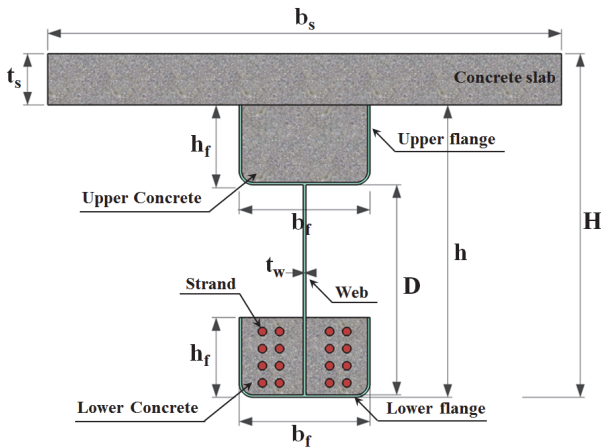


Fig. 1. Cross-section of multistage prestressed composite girder

Table 1. Fabrication procedure of the girder system

Stage	Procedures
Step 1	Steel girder setup
Step 2	Upper concrete prefix
Step 3	Lower concrete prefix
Step 4	1 st stage prestressing
Step 5	Multi-stage prestressing

Table 2. Parametric analysis cases

Cases	Upper / lower concrete pouring method	Long / short tendon prestressing method
1	Separate	Separate
2	Separate	Simultaneous
3	Combined	Separate
4	Combined	Simultaneous

더에는 편심모멘트(부모멘트)가 유발되어 상부플랜지 콘크리트 부재에는 인장응력(+)이 작용하고, 하부플랜지 콘크리트 부재에는 압축응력(-)이 작용할 것으로 예상된다. 또한 단계적으로 긴장력을 도입하면 외측부 상부플랜지 콘크리트 부재에는 긴장력을 한꺼번에 도입시킨 전체긴장 모델에 비해 인장응력 발생량이 감소될 것으로 예상된다. 또한, 상하부플랜지 콘크리트를 분리 타설함으로써 하부플랜지 콘크리트 타설 시에 기 설치된 상부플랜지 콘크리트에 압축응력이 유발되면 상기의 인장응력은 상당히 상쇄된다. 이러한 특성들을 고려하여 이 논문에서는 각 제작단계별 합성단면에 대한 극한 휨거동과 강연선 긴장력 도입에 따른 보강효과를 수치 해석적으로 분석하고 3차원 유한요소해석을 수행하여 평가하였다. 이로부터 4가지 제작단계 중 공용하중 재하 이전의 선응력 발생 양상이 가장 유리한 표준모델을 선정하여 도로교설계기준(2010)^[2]에서 제시하는 공칭내하력과 비교 분석을 수행하였다.

3. 수치해석 모델링

3.1 기본구성 및 제원

이 해석적 연구를 위한 해석모델의 단면은 콘크리트와 강재의 장점을 혼용하여 개발된 다단계 프리스트레싱 합성거더^{[3],[4]}를 기반으로 하고 도로교설계기준(2010)의 허용응력 요구조건에 만족하도록 단면제원을 선정하였다. 연구에서 사용된 합성거더 모델의 상세한 단면제원은 Table 3과 같다. 이미 언급된 바와 같이 합성거더는 강거더와 콘크리트로 구성되며, 모듈 및 구간별 강연선 배치방안과 단계별 소요 긴장량을 합리적으로 예측하고 결정하기 위해 시공단계별 변수해석이 요구된다. 이에 제작단계를 고려한 수치 해석적 모형을 수립하였다.

변수해석을 위한 콘크리트 타설순서와 강연선 긴장방법은 Fig. 2와 같이 4가지 해석모델로써 정해졌으며, 이에 따라 시공단계별 수치해석을 수행하였다.

Table 3. Girder dimensions

b_s (mm)	t_s (mm)	h_f (mm)	b_f (mm)	t_w (mm)	D (mm)	h (mm)	H (mm)
2,325	240	372	624	12	980	1,364	1,604

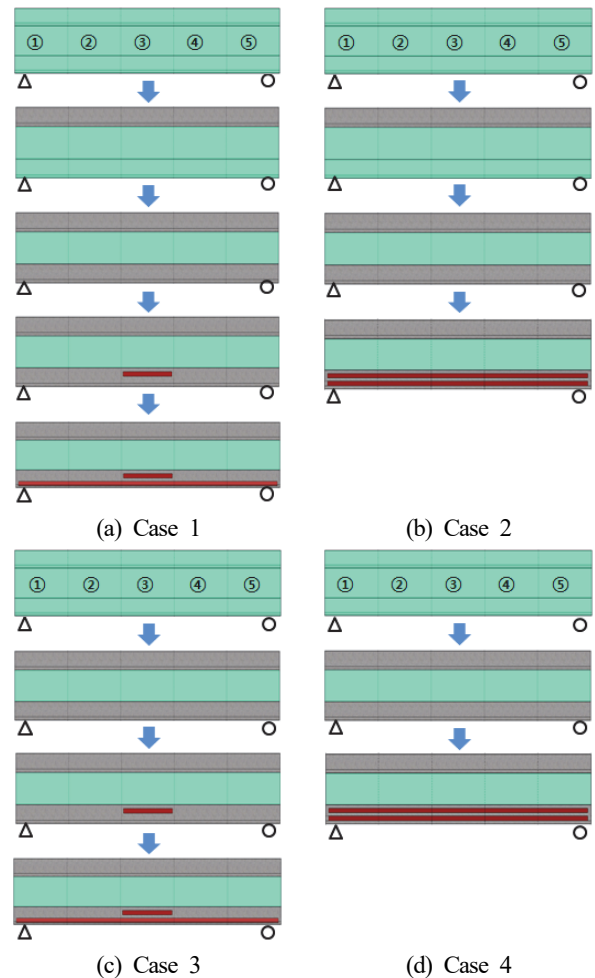


Fig. 2. Model cases

3.2 재료특성

3.2.1 강재후판

강재 재료모델은 고인성 강재 HSB500을 사용하고, 강재를 구성하는 상하부플랜지 및 복부판 두께는 12mm를 적용하였다. 강재의 기준항복강도는 설계기준에서 제시하는 항복강도 380MPa를 사용하고, 완전탄소성 비선형 재료모델을 적용하였다.

3.2.2 콘크리트

콘크리트 재료모델에 적용된 콘크리트 설계강도(f_{ck})는 다음과 같다. 상하부플랜지 콘크리트의 압축강도는 45MPa, 바닥판 콘크리트의 압축강도는 27MPa를 사용하였다. 합성거더 콘크리트 부재의 휨거동 특성을 해석적 방법으로 얻기 위해서는 재료의 응력-변형률 관계를 사용해야한다. 이는 모

멘트-곡률 관계와 같은 유사한 양상을 보인다(Lee, 2013)^[5]. 이를 참조하여 이 논문에서는 보통강도콘크리트와 고강도 콘크리트에 모두 적용할 수 있는 응력-변형률 관계곡선을 이용하였다. 콘크리트 응력-변형률 관계곡선은 널리 적용되고 있는 Hognestad가 제시한 식 (1)과 같은 곡선으로 가정하였다. 이 해석모델에 적용된 응력-변형률 곡선은 Fig. 3

과 같고, 응력-변형률은 Table 4에 나타난 바와 같다.

$$f_c = f_{ck} \left[2 \times \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{d1}} - \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{d1}} \right)^2 \right] \quad (1)$$

3.2.3 강연선

해석모델의 PC강재는 KS D 7002 SWPC7B 저탄소저탄성 강연선을 사용하였다. 강재의 기준인장강도는 1900MPa, 기준항복강도는 1600MPa이며, 강연선의 공칭단면적은 138.7mm²이다. 다단계 자중 프리플렉스 및 프리스트레싱 합성거더 경간별 실측 압축력을 재하하고 다단계 프리스트레싱을 구현할 수 있도록 강연선을 구간별로 배치하였다. 강연선 구간별 단면 배치 방안은 아래 Fig. 4와 같다.

3.2.4 이형철근

해석모델의 철근의 규격은 SD40을 사용하였고, 기준항복강도는 400MPa, 공칭단면적 126.7mm²의 이형철근을 강재 거더 상하부플랜지에 종방향으로 배치하였다. 철근배치는 Fig. 5와 같이 상하부플랜지에 동일한 간격을 적용하였다.

3.3 유한요소해석 모델링

이 연구에서는 유한요소해석모델의 강재 재료물성치는 현행 설계기준을 준용하여 탄성계수는 205,000MPa, 포아송비는 0.3을 적용하였다. 콘크리트와 강재와의 접합면은

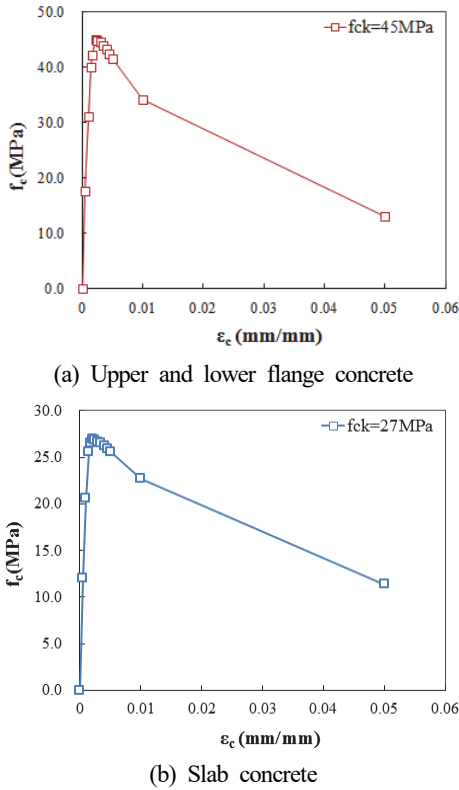


Fig. 3. Stress-strain curve

Table 4. Stress-strain data

Upper and lower flange concrete				Slab concrete			
Ascending		Descending		Ascending		Descending	
ϵ_c	f_c	ϵ_c	f_c	ϵ_c	f_c	ϵ_c	f_c
	MPa		MPa		MPa		MPa
0	0.0	0.0025	39.9	0	0.0	0.0025	23.9
0.0005	15.8	0.003	39.6	0.0005	10.7	0.003	23.7
0.001	27.7	0.0035	39.1	0.001	18.3	0.0035	23.5
0.0015	35.6	0.004	38.4	0.0015	22.7	0.004	23.3
0.0017	37.6	0.0045	37.8	0.0017	23.6	0.0045	23.0
0.0022	40.0	0.005	37.0	0.0022	24.0	0.005	22.8
-	-	0.01	30.4	-	-	0.01	20.2
-	-	0.05	11.7	-	-	0.05	10.2

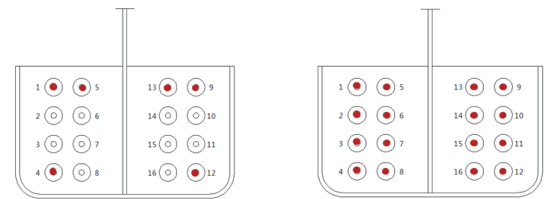


Fig. 4. Arrangement of prestressing tendons in lower flange (concrete member in steel casing)

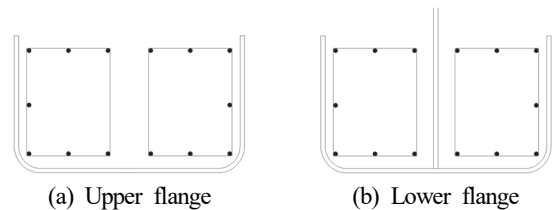


Fig. 5. Reinforcement plan

완전합성으로 가정하여 서로 절점을 공유하는 방식으로 모델링에 적용하고, 경계조건은 Fig. 6과 Table 5에 나타난 바와 같이 합성거더의 하부플랜지에 단순지지 조건을 적용하였다.

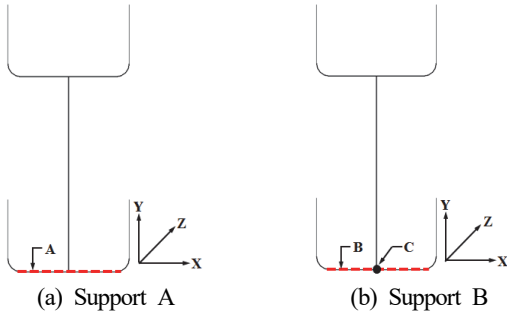


Fig. 6. Boundary conditions on girder cross-sections

Table 5. Boundary conditions

No.	T_x, T_r	T_y, T_θ	T_z, T_z	R_x, R_r	R_y, R_θ	R_z, R_z	Coord. system
A	○	●	○	○	○	○	Rectangular
B	○	●	●	○	○	○	Rectangular
C	●	●	●	○	○	○	Rectangular

○ Free ● Fixed

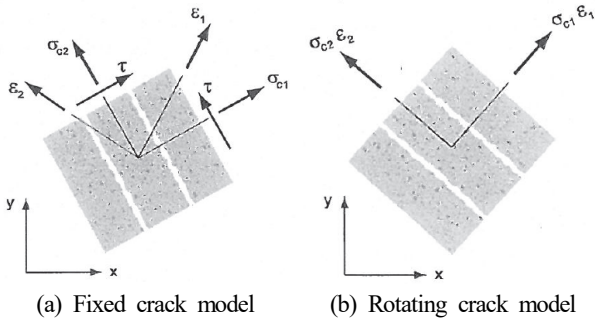


Fig. 7. Total strain crack model

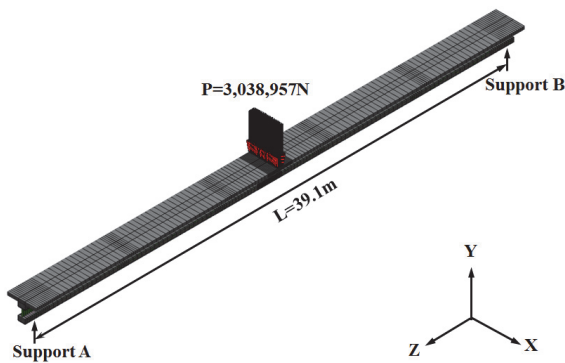


Fig. 8. Finite element mesh and loading scheme

강재거더를 형성하는 강재 후판은 Von Mises 재료비선형 모델을 적용하고, 합성플랜지를 형성하는 상하부플랜지와 바닥판 콘크리트는 완전탄소성 비선형 재료모델 및 이산균열모델의 전변형률 균열모델(total strain crack model)을 각각 적용하였다. Fig. 7과 같이 균열 축을 취급하는 방법에 따라 고정균열모델(fixed crack model) 및 회전균열모델(rotating crack model)로 구분되는 두 가지 방법을 제공한다. 전자는 균열 축이 한번 결정되면 변화하지 않는 것으로 가정하는 방법이며, 후자는 주변형률의 변화에 따라 균열 방향이 계속해서 회전한다고 가정하는 방법이다. 이 해석모델에는 Fig. 7(a) 방법을 적용하였다.

수치해석을 위해 유한요소해석 범용프로그램인 Midas FEA^[6]를 이용하였으며, 강연선 단계긴장 및 콘크리트 타설 순서와 같은 제작단계를 적절히 고려한 시공단계별 탄성해석 및 비선형해석을 수행하였다. 이때 하중은 Fig. 8과 같이 단순보 모델의 중앙부에 집중하중으로 재하 하고, 긴장력에 대해서는 강연선을 1차원 선요소로 정의하여 솔리드요소 사이

Table 6. Construction stage analysis

Stage	FE modeling
Step 1	Steel girder (Plate element)
Step 2	Upper concrete (Solid element)
Step 3	Lower concrete (Solid element)
Step 4	1st stage prestressing
Step 5	Multi-stage prestressing

절점에 모델링하고 포스트텐션 방식으로 강연선의 소요 긴장력을 응력 형태로 재하하였다. 시공단계별 비선형 해석은 수렴속도가 빠르고 적은 수의 반복을 통해서도 수렴이 가능한 Newton-Raphson방법^[7]을 적용하였다. 합성거더의 제작단계를 고려하여 구현된 유한요소해석 모델은 Table 6과 같다.

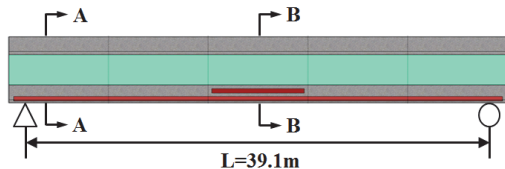
4. 해석결과

4.1 시공단계별 선형 해석

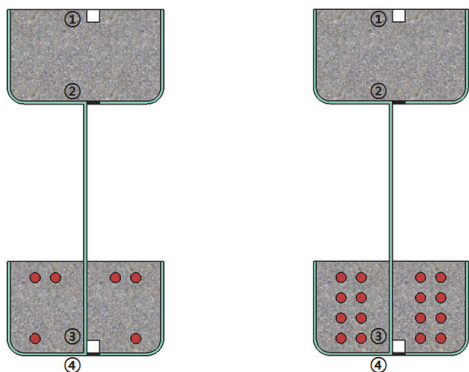
다단계 프리플렉스 및 프리스트레싱 합성거더의 하부플랜지 콘크리트 부재에 작용하는 인장응력을 최소화하고, 시공성 향상을 위해 결정된 4가지 제작단계에 관한 시공단계별 선형해석을 수행하였다. 응력의 평가 위치는 Fig. 9와 Table 7에 제시하였다. 특히, 강연선의 긴장력 도입이 완료되는 시점에 외측부와 중앙부 상단 콘크리트 부재 단면의 종방향 응력(Z방향)을 중점적으로 확인하였다. Table 8은 각 해석모델의 시공단계 특성을 고려하여 수치 해석적으로 평가된 단계별 응력을 비교하고 있으며, 각 제작단계의 차이가 합성거더에 미치는 영향을 분석한 것이다.

시공단계별 해석결과를 살펴보면 중앙부 상단 콘크리트 부재 단면은 해석모델1(Case 1)과 해석모델2에서 압축응력(-)이 작용하며, 해석모델3과 해석모델4에서 인장응력(+)

으로 나타났다. 외측부에서는 해석모델1(Case 1)에서만 압축응력(-) 상태로 나타났고 그 외에서는 크기에 차이는 있으나 모두 인장응력(+)이 작용한다. 이는 콘크리트의 자중을 강재가 부담하도록 콘크리트 타설 순서를 정하고, 강연선 긴장응력은 구간별로 강연선을 배치하여 단계적으로 긴장응력을 도입한 효과에 의한 것으로 보인다. 이에 따라 해석모델1이 다른 해석모델보다 콘크리트 부재에 나타난 응력상태로써 가장 유리한 것을 확인할 수 있다. 이에, 해석모델1을 표준모델로 선정하고 제작단계에 따른 응력차이를 확인하기 위해 해석모델2,3,4와 비교하였다. Table 8에 나타난 바와 같이 상부플랜지 콘크리트 중앙부는 -0.2~3.1MPa, 외측부는 1.0~2.9MPa의 응력차이가 발생한다. 이는 하부플랜지 콘크리트에 설치된 강연선에 긴장응력을 단계적으로 도입하여 인장에 취약한 콘크리트 부재에 압축력이 가해진 효과로 보인다. 따라서 논문에서 제시한 합성거더 제작방식에



(a) Plane view



(b) A-A section

(c) B-B section

Fig. 9. Composite girder cross-sections

Table 7. Locations for stress evaluation

Location	Member
①	Upper flange-concrete
②	Upper flange-steel
③	Lower flange-concrete
④	Lower flange-steel

Table 8. Longitudinal stresses in upper flange-concrete

Section		Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Side span	Stress (MPa)	-0.5	+1.4	+0.5	+2.4
	Diff.	-	1.9	1.0	2.9
Middle span	Stress (MPa)	-0.9	-1.1	+2.2	+2.0
	Diff.	-	-0.2	3.1	2.9

Table 9. Longitudinal stresses in mid-span section along construction stages

Section	Steel (MPa)		Concrete (MPa)	
	Upper flange	Lower flange	Upper flange	Lower flange
Stage 1	-29.0	+39.7	-	-
Stage 2	-61.9	+86.1	-	-
Stage 3	-69.7	+123.8	-3.2	-
Stage 4	-83.6	+23.3	-1.3	-13.3
Stage 5	-94.7	-30.9	-0.9	-20.5
Remarks	("-" : Values are not applicable)			

Table 10. Phased member stress

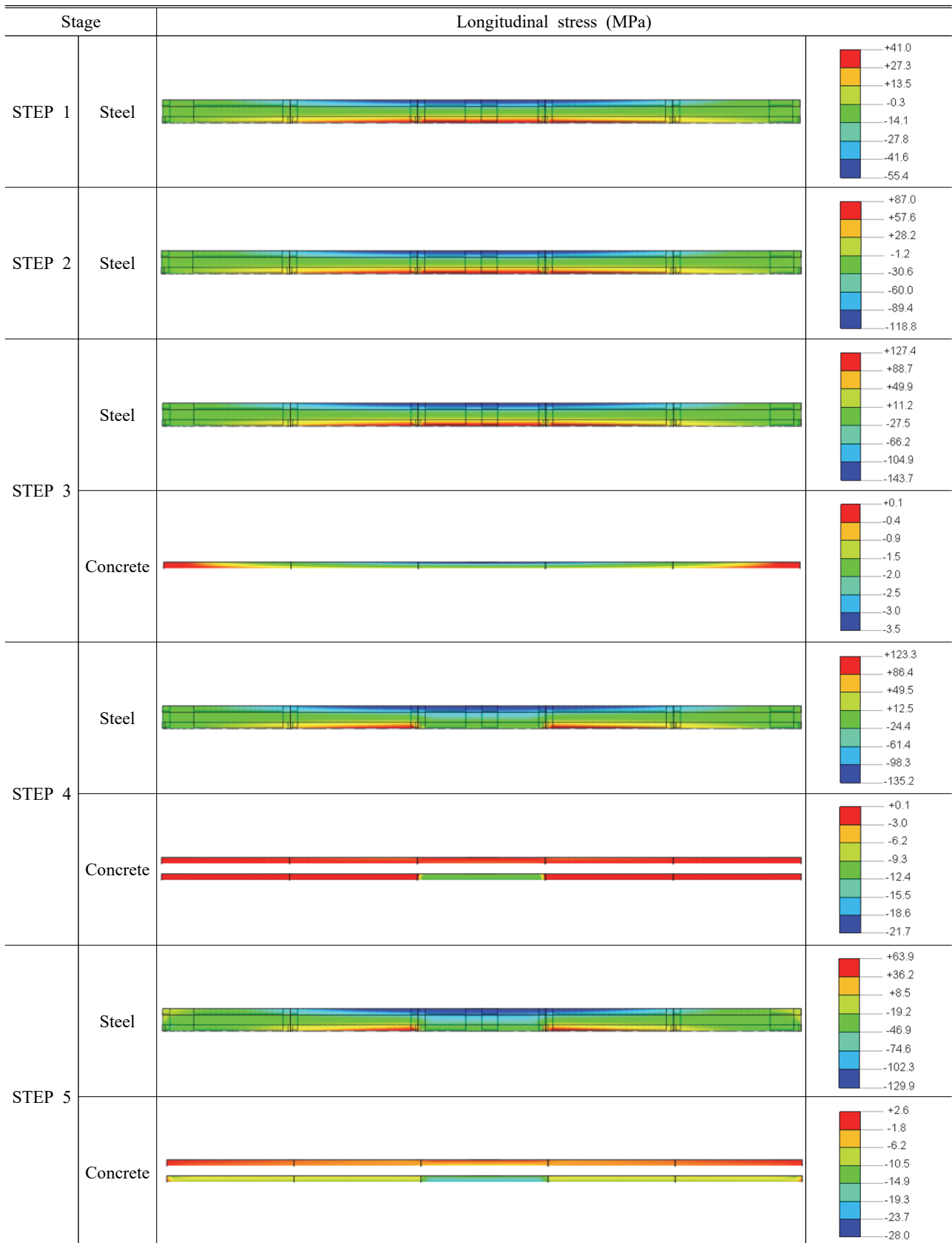
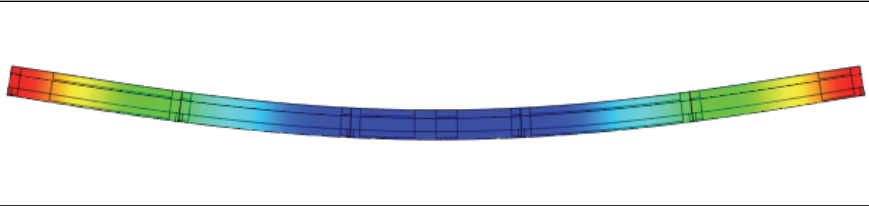
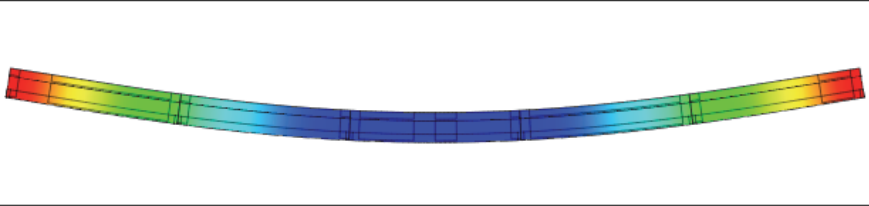
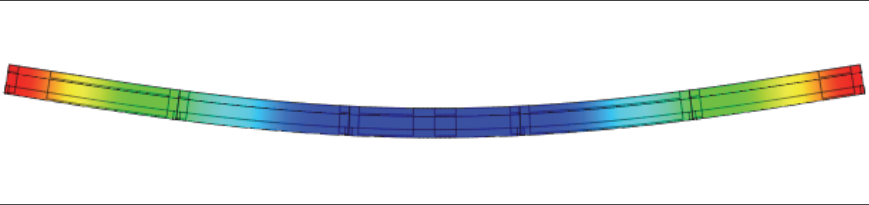
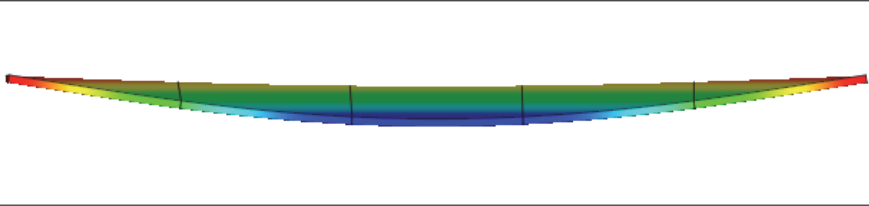
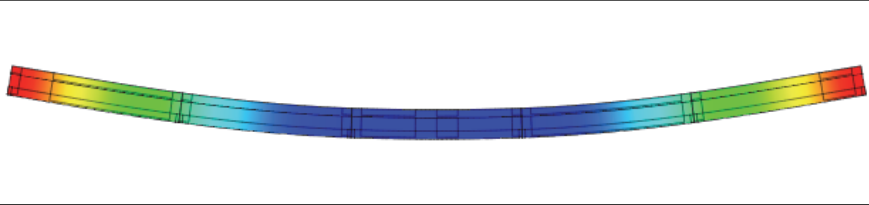
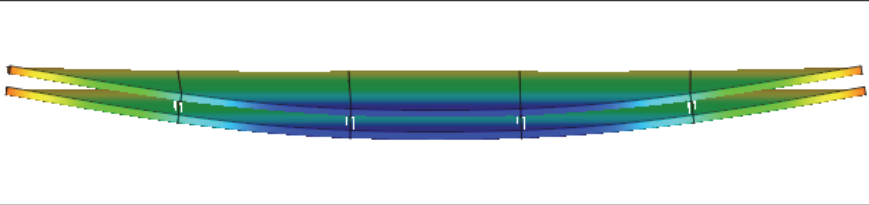
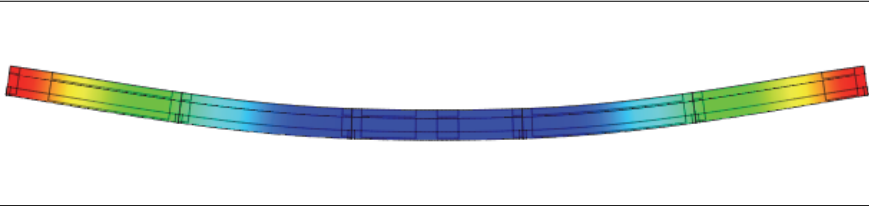
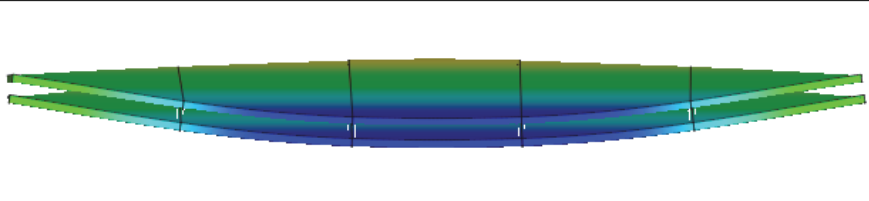


Table 11. Phased member displacement

Stage		Vertical displacement (mm)	
STEP 1	Steel		<ul style="list-style-type: none"> +2.0 -6.2 -14.4 -22.6 -30.8 -39.0 -47.2 -55.4
	Concrete		<ul style="list-style-type: none"> +4.3 -13.3 -30.9 -48.5 -66.1 -83.7 -101.3 -118.9
STEP 2	Steel		<ul style="list-style-type: none"> +5.6 -17.5 -40.5 -63.6 -86.7 -109.8 -132.8 -155.9
	Concrete		<ul style="list-style-type: none"> +5.6 -17.5 -40.6 -63.6 -86.7 -109.7 -132.8 -155.8
STEP 3	Steel		<ul style="list-style-type: none"> +5.0 -14.2 -33.4 -52.6 -71.7 -90.9 -110.1 -129.2
	Concrete		<ul style="list-style-type: none"> +26.7 +4.4 -17.9 -40.1 -62.4 -84.7 -107.0 -129.2
STEP 4	Steel		<ul style="list-style-type: none"> +3.2 -9.7 -22.5 -35.3 -48.1 -61.0 -73.8 -86.6
	Concrete		<ul style="list-style-type: none"> +69.3 +47.0 +24.7 +2.5 -19.8 -42.1 -64.4 -86.6

의거하여 콘크리트에 작용하는 인장응력을 최소화하고 전체 콘크리트 부재에 압축응력이 지배하는 무인장 상태가 가능한 것으로 사료된다.

Table 9는 표준제작해석모델(Case 1)의 제작단계마다 중앙부 단면 각 부재의 종방향 응력을 정리한 표로써, 이로부터 단계별 응력 변동 양상을 살펴보면 다음과 같다. 1단계는 강재가 단순지지 된 상태로 강재거더에 자중이 작용하여 강재 상부플랜지에는 압축응력 29.0MPa, 하부플랜지에는 인장응력 39.7MPa이 작용한다. 2단계는 강재 상부플랜지에 콘크리트가 타설되는 상태로써, 강재가 콘크리트의 자중을 부담하여 1단계와 동일한 양상이나 보다 증가된 응력이 발생하였고, 콘크리트는 굳지 않은 상태이므로 아직 응력이 발생하지 않는다. 3단계는 하부플랜지에 콘크리트가 타설되는 상태로써, 상부가 합성된 거더에 작용하므로, 중립축의 상향 이동으로 인해 상부 압축응력보다는 하부 인장응력이 크게 증가하였다. 상부 콘크리트 부재에도 압축응력 3.2MPa이 처음으로 도입되었고, 단면 강성에 참여하지 않은 하부 콘크리트에는 응력이 발생하지 않는다. 4단계는 하부플랜지 중앙부에 설치된 강연선에 긴장응력이 도입되는 상태로 하부 강재 및 콘크리트 부재 뿐 만 아니라 상부플랜지에도 압축응력이 증가하였다. 하부플랜지는 여전히 인장응력 상태이나 압축효과로 인해 크게 감소하였다. 상부 콘크리트 상단에는 긴장력 편심효과로 인해 상단 압축응력은 줄어들었으나 여전히 압축상태에 놓여있다. 5단계는 전 구간에 설치된 강연선에 긴장응력을 도입시킨 상태로 하부 콘크리트뿐만 아니라 강재 부재도 압축응력 상태가 되었다. 즉, 공용하중에 상반된 선하중 효과가 콘크리트 부재뿐만 아니라 주요 부재인 강재 하부플랜지에도 도입되어 공용 하중에 대한 휨저항성의 증가에 기여할 것으로 기대된다.

상부 콘크리트 상단에 작용하는 압축응력은 0.4MPa 감소하였으나 여전히 압축응력 상태에 있고, 하부 콘크리트에는 선하중 압축응력이 성공적으로 도입되었다. 이는 상부는 늘어나고 하부는 줄어드는 변형상태인 부모멘트 효과가 작용한 결과로 보인다. 강재 상부플랜지에도 꾸준히 압축응력이 증가되는데, 이는 상부 콘크리트 케이싱의 하부 가로부재를 형성하고 있으므로 중립축에 상대적으로 가까워서, 강연선에 의해 직접 작용하는 축력에 의한 압축효과가 강선 편심에 의한 인장효과보다 크기 때문인 것으로 보인다.

합성거더의 콘크리트 부재에도 강재와 마찬가지로 강연선의 효과가 나타나는 것을 해석결과를 통해서 알 수 있다.

해석결과로부터 제시된 제작과정과 단계는 합성거더의 강재와 콘크리트의 장점을 극대화시키고, 공용 중 하중효과와 상반되는 선하중 효과가 적절히 유도되는 것이 확인되었다.

Tables 10, 11은 시공단계별 전체부재의 종방향 응력선도 및 연직변위를 나타내었다. 자중 및 프리스트레싱 하중도입에 따른 단계별 응력 및 처짐을 확인할 수 있었다. 특히 프리스트레싱 도입에 따른 중앙부 단면의 압축응력 증가와 더불어 상향 처짐이 발생함을 확인할 수 있었다. 단, 콘크리트 처짐 형상의 경우 강재 요소와 절점이 공유되는 콘크리트 요소에서 단계별 해석에 따른 강재요소와의 처짐량 이격으로 인한 더미의 변형이 도시되었다.

4.2 시공단계를 고려한 비선형 해석

Fig. 10은 합성거더 해석모델의 표준 제작단계에 의한 시공단계를 고려한 비선형 해석결과로부터 평가된 극한상태 휨거동이다. 경간중앙 단면의 최대휨모멘트는 27,329 kN·m으로 평가되었다.

Table 12에 비교된 바와 같이, 제작단계 해석경우(Cases)에 따른 극한 휨강도 평가 결과는 크게 다르지 않다. 중앙부와 외측부 단면의 강연선 배치에 차이를 둔 단계긴장 방법(Case 1과 3)과 전 구간에 설치된 강연선 강재량이 동일한 전체긴장 방법(Case 2와 4)에 있어 극한 휨강도가 동일한 수준인 것에 주목할 필요가 있는데, 외측부 하부 긴장량과는 다소 무관한 경간중앙 상부슬래브 콘크리트의 압축파괴로 인해 극한상태에 도달한 것으로 분석되었으며 외측부 하부

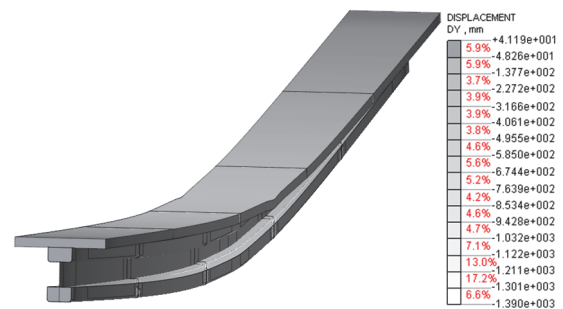


Fig. 10. Ultimate bending behavior (case 1)

Table 12. Nonlinear analysis results

Section	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Maximum bending moment (kN·m)	27,329	27,329	27,329	27,329

콘크리트 긴장력의 저감이 전체 거더의 휨강도 수준에 별다른 유의미한 영향이 없는 것을 볼 수 있다. 이는, 비선형비탄성 상태에 가장 먼저 도달하여 거더 전체의 휨성능에 지배적인 영향을 갖는 경간중앙 단면의 제원 특성이 모든 해석경우에서 동일한데다, 제작과정 상의 차이로 유발된 단면 내 선응력(외력 재하 이전의 응력) 분포의 차이는 비선형 극한상태로 진행하면서 합성거더의 연성거동에 의해 적절히 분배되는 등에 기인한 것으로 사료된다.

Fig. 11은 각 해석모델의 시공단계를 고려한 비선형해석으로부터 분석된 경간 중앙 단면 위치에 재하 된 휨모멘트-연직처짐량 관계를 나타내고 있다. 최대모멘트의 약 70%에 해당되는 범위까지는 선형거동을 보이다가 이후 비선형비탄성 거동이 두드러지게 나타난다. 허용 휨모멘트(M_a)에 해당하는 범위까지 균일한 강성 수준의 탄성 거동을 지속하며 소요

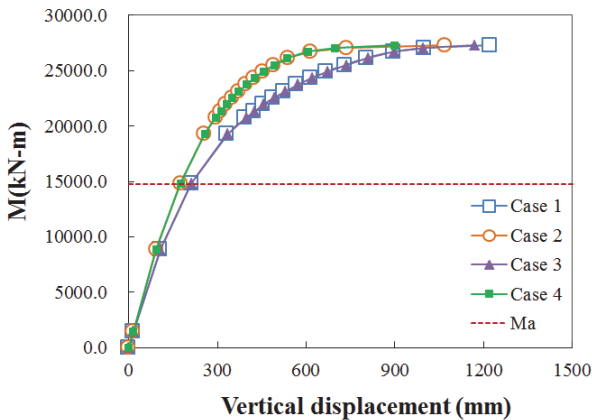


Fig. 11. Bending moment-displacement diagram at mid-span section

Table 13. Vertical displacements along bending moments

Bending moment (kN · m)	Vertical displacement (mm)			
	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
5,000	59	52	59	52
10,000	127	108	127	108
15,000	215	178	216	178
20,000	361	274	365	275
25,000	673	456	679	459

Table 14. Comparison of flexural strength with design specifications

Analysis result (FEA)	Design specifications			
	M_a		M_n	
kN · m	kN · m	Diff. (%)	kN · m	Diff. (%)
27,329	14,743	85.4	25,064	9.0

성능을 유지하고 있음이 확인되었다. 제작단계가 상이한 해석 모델들을 서로 비교해보면 휨모멘트 약 20,000kN·m까지 변위가 비교적 선형적으로 증가하고, 휨모멘트 약 24,000kN·m 부터는 변형경화가 일어나는 비선형 거동이 뚜렷해진다. 해석결과로부터 얻은 각 해석모델의 모멘트-변위 곡선 형태는 대체로 유사한 양상을 보인다.

Table 13은 해석결과로부터 작용 휨모멘트에 상응하는 경간 중앙의 연직처짐량을 나타낸다. 강연선 배치와 긴장방법의 차이는 선형탄성 거동 범위에서는 괄목할만한 큰 차이를 나타내지 않지만, 비선형 거동 범위에서 변위제어에 다소 효과가 있을 것으로 보인다.

Table 14는 해석결과를 설계기준에 근거해서 산정한 휨성능과 비교한 결과이다. 합성거더의 휨성능은 도로교설계기준 해설(2008)^[8]을 근거해서 산정한 허용휨모멘트(M_a)보다 85.4%, 기준강도 휨모멘트(M_n)에 비해 9.0% 이상 상회하는 것으로 분석되었다. 따라서 이 논문에서 다루는 합성거더는 설계기준에서 예상하는 적정 공칭내하력을 보유하는 것으로 확인되었으며, 관련 설계기준에서 제시하는 안전율을 충분히 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

이 논문에서는 거푸집의 설치없이 간편하게 합성단면을 형성하고 다단계의 프리플렉스 및 프리스트레싱을 구현할 수 있도록 고안된 합성거더의 각 제작단계별 응력분포와 최대휨강도에 관한 수치해석을 수행하여, 제작과정의 특성에 따라 비교 분석하였다. 이 연구로부터 도출된 주요 결론은 다음과 같다.

- (1) 제작과정에서 콘크리트 부재에 발생하는 인장응력은 상반된 선하중 효과로써 서로 상쇄되게 하거나 단계적 긴장력 도입에 의해 제어할 수 있는 것을 확인하였다. 따라서 해당 기술을 적용하여 시공 중 및 공용하중 재하 시에 콘크리트 부재의 무인장 상태를 유도하여 합성거더의 내구성을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.
- (2) 변수해석 결과를 통해, 콘크리트 타설과정과 강연선 긴장순서에 따라 응력분포가 다르게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이때 상부 콘크리트 부재에 작용하는 응력은 표준제작해석모델(Case1)에서 가장 적절한 수준의 압축상태에 있는 것으로 분석되었다.
- (3) 합성거더 표준제작 모델의 최대휨강도는 현행 설계기준

에서 제시하는 허용휨모멘트에 비해 85.4%, 기준강도 휨모멘트보다 9.0% 이상 상회하는 것으로 평가되었다. 이러한 합성거더는 설계기준에서 예상하는 적정 공칭내하력을 보유하는 것으로 확인되어 소요 안전율을 충분히 확보 가능할 것으로 판단된다.

- (4) 비선형 해석 결과의 비교를 통해, 외측부 하부콘크리트 긴장력의 단계적 저감이 전체 거더의 휨강도 수준에 별다른 유의미한 영향이 없는 것을 볼 수 있다. 이로써, 강연선과 긴장량을 경간 내 위치에 따라 단계적으로 적당하게 적용하는 것은 합리적이다.

감사의 글

이 논문은 2015년도 한밭대학교 교내학술연구비의 지원을 받았음.

참고문헌(References)

- [1] 한밭대학교 산학협력단(2013) 거푸집겸용 절곡부재 적용 초간편 합성 빔거더 기술개발: 최종보고서, 연구보고서, 한국산학연합회.
Industry-University Cooperation Foundation of Hanbat National University (2013) *Development of the Manufacturing Process of a Prestressed Composite Girder Cast without Form-Work, The Final Report, Research Report*, Korea Association of University, Research Institute and Industry, Korea (in Korean).
- [2] 국토해양부(2010) 도로교설계기준.
Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2010) *Highway Bridge Design Standard*, Korea (in Korean).
- [3] 김민호, 오정균, 최병호(2014) 거푸집겸용 절곡부재 적용 스마트간편합성거더의 휨성능 시험 평가 방안, 한국산학기술학회 춘계학술발표회 논문집, 한국산학기술학회, pp.232-233.
- Kim, M.H., O, J.G., and Choi, B.H. (2014) Flexural Performance Test Plan for Smart Composite Girder Using Cold Formed Flanges, *Proceedings of Annual Spring Conference Korea Academia-Industrial cooperation Society*, KAIS, pp.232-233 (in Korean).
- [4] 김정원, 김태봉, 최병호(2014) 거푸집겸용 절곡부재적용 초간편합성거더의 시공단계별 구조성능 수치해석, 한국산학기술학회 학술발표회 논문집, 한국산학기술학회, pp.57-59.
- Kim, J.-W., Kim, T.-B., and Choi, B.H. (2014) Construction Sequence Analysis on Structural Performance of Simple Steel-Concrete Composite Girder with Pressbraked Flanges, *Proceedings of Annual Autumn Conference Korea Academia-Industrial cooperation Society*, KAIS, pp.57-59 (in Korean).
- [5] 이형준(2013) 고강도 재료를 사용한 철근콘크리트 보 단면의 곡률연성지수 예측, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제33권, 제2호, pp.483-493.
- Lee, H.J. (2013) Predictions of Curvature Ductility Factor of Reinforced Concrete Beam Sections Used High Strength Concrete and Steel, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol.33, No.2, pp.483-493 (in Korean).
- [6] Midas Information Technology (2008) *Midas FEA, Analysis & Algorithm Civil Engineering, Ver. 3.6.0*, Midas IT Co., Ltd., Korea.
- [7] Midas Information Technology (2008) *Midas FEA, Midas Technical Paper, Ver. 3.6.0*, Midas IT Co., Ltd., Korea.
- [8] 대한토목학회(2008) 도로교설계기준 해설, 기문당.
Korea Society of Civil Engineers (2008) *Commentary for Highway Bridge Design Standard*, Kimmoondang, Korea (in Korean).

요 약 : 이 논문은 거푸집의 설치없이 간편하게 합성단면을 형성하고 다단계의 자중 프리플렉스 및 프리스트레싱을 비교적 쉽게 구현할 수 있도록 고안된 합성거더 시스템의 휨성능에 관한 것이다. 시공단계를 고려한 3차원 유한요소해석모형을 수립하고 콘크리트 타설방법과 강연선 긴장방법을 변수로 지정하여 합성거더 단면에 작용하는 선응력 분포와 강연선에 의해 도입되는 긴장효과를 수치 해석적으로 분석하였다. 변수 해석 결과를 비교하여 응력분포가 가장 유리한 해석모델의 제작과정을 표준제작단계로 선정하여 비선형비탄성 해석을 통해 극한휨강도를 평가하였다. 이를 국내 설계기준에서 제시하는 기준강도와 비교 검토해보니, 적정 공칭내하력을 보유하는 것으로 확인되어 소요 안전율을 충분히 확보 가능할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 시공단계별해석, 휨강도, 프리스트레스트 거더, 강합성거더, 구조성능