한국복합신소재구조학회 논문집 제6권, 제2호, 2015년 6월
J. Korean Soc. Adv. Comp. Struc. Vol. 6, No. 2, pp. 77-84, June 2015
DOI http://dx.doi.org/10.11004/kosacs.2015.6.2.077

ISSN 2093-5145(Print)
ISSN 2288-0232(Online)

40m 조합모듈교량 상부구조 이송에 따른 안전성 검토

박성민[1] · 정우영[2]

강릉원주대학교 토목공학과 석사과정[1], 강릉원주대학교 토목공학과 교수[2]

Safety Evaluation of 40m Combined Modular Bridge Super-Structures Based on Transportation Lifting Methods

Park, Sung-Min[1] · Jung, Woo-Young[2]

[1]Master Course, Department of Civil Engineering, Gangneung-Wonju National University, Gangneung, South Korea
[2]Professor, Department of Civil Engineering, Gangneung-Wonju National University, Gangneung, South Korea

Abstract: The purpose of this study was the analytical safety evaluation on the super-structure of precast modular bridge using standardized modular members and robotic construction during the transportation routing and lifting conditions. In order to evaluate the safety performance of the bridge system, 3-D full scale Finite Element (FE) of 40 m standardized modular block was developed in ABAQUS, followed by the analytical study to classify the structural system according to steel girder structures: 1) modular bridge block lifting method including the steel girder system; 2) modular bridge block lifting method without the steel girder system. The results from the analytical study revealed that the maximum stress of each modular member was within the maximum allowable stresses during lifting condition. However, the stress concentration at the connected area was more critical in comparison to the behavior of 40 m combined modular blocks during lifting time

Key Words: Modular block, 3D finite element, Robotic construction, Bridge

1. 서 론

모듈러 교량 기술개발 및 실용화 기술은 선진 기술의 추격 또는 기존 조립식 거더 교량의 단순한 개선이 아닌 세계 최초로 모듈러 기술을 적용한 영구교량을 개발하여 상용화 하는 것을 목적으로 하며 전 세계적으로 손상 교량의 조기 복구, 증가하는 노후 교량의 교체와 도심지 교량 건설까지 교량의 단기 건설에 대한 관심이 높아지고 이에 관한 연구가 활발히 진행되고 있는 실정이다. 일반적으로 통용되고 있는 모듈러 기술은 레고(Lego)와 같이 사전제작된 표준 부재들을 조합하여 다양한 모양/기능의 전체 시스템을 구성하는 기술을 의미한다. 이러한 모듈러 기술을 교량에 접목하면 경제성 개선, 사업기간 단축, 품질안정, 유지관리 간편성 측면에서 큰 효과를 거둘 수 있다. 본 연구에서는 강교량의 경우 거더의 제작, 운반, 거치의 과정이 이미 모듈화하여 이루어지고 있으며, 모듈의 운반 및 시공이 기존의 강교량 연결기법과 크게 다르지 않기 때문에 모듈러 교량으로서의 적용은 크게 어렵지 않을 것으로 판단되나, 제시된 40m 조합모듈 상부구조의 경우 현장제작 및 운반 시 발생 가능한 구조체의 거동 및 응력을 3차원 유한요소해석을 통해 검토하였다.

Key Words: 모듈러 교량 기술, 조합모듈, 복합구조, 휨 보강, 박스형 플레이트

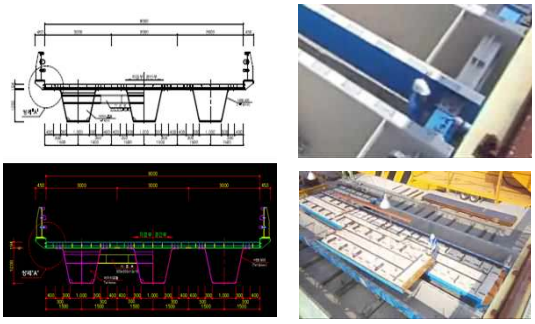
Corresponding author: Jung, Woo-Young
Department of Civil Engineering, Gangneung-Wonju National University, 7 Jukhun-gil, Gangneung, 210-702, South Korea.
Tel: +82-33-640-2421, Fax: +82-33-646-1391 , E-mail:woojung@gwnu.ac.kr

Received May 29, 2015 / Revised June 5, 2015 / Accepted June 9, 2015

2. 본 론

일반적으로 모듈화 된 구조체의 운반의 경우 매우 간단하게 수작업에 의해서도 각 지지점에 분산되는 하중을 쉽게 고려할 수 있다. 그러나 지지점, 즉 체결구에서 발생 가능한 응력집중의 경우 수계산에 의해서는 예측이 불가능하며 3차원 유한요소해석을 통하여 국부적으로 발생 가능한 응력 패턴 및 크기 등을 예측할 수 있다. 본 연구에서는 강재 단위모듈 상부구조의 설계형상 및 제원, 그리고 이들 상부구조체의 이송방법에 대한 내용을 우선 소개하고 이들 상부구조체의 이송 및 시공방법에 따른 모듈 구조체의 거동특성을 평가하였다.

본 연구의 대상 구조체인 강 모듈러 상부구조체의 경우 ㈜포스코 솔루션센터에서 연구, 개발한 조립식 모듈교량으로서 보다 폭넓고 효율적인 교량가설을 위하여 각각의 단위모듈 형상 및 길이를 산정하였으며 실제 현장시험시공을 위하여 최종 설계된 시제품의 경우 길이가 12m와 16m로 각각 설계, 제작된 표준 단위모듈의 조합으로 40m의 조합모듈이 설계, 제작되었다. Fig 1은 ㈜포스코 솔루션센터에서 개발된 표준 모듈러 교량의 형상 및 제원, 실제 제작된 현장시제품을 보여준다.



(a) Design Drawing (b) Real Shape

Fig. 1 Design and Configuration of a Module Bridge

2.1 Lifting 방법

일반적으로 모듈러 상부구조 시공 시 리프팅방법에는 Fig 2에서 보여지 듯 크레인을 활용한 체결 호이스트(Hoist)를 이용하는 방법과 로프 등을 이용하는 방법으로 분류될 수 있다. 이들 방법들은 각각 체결조건 및 중량에 따라 2-Point지지, 4-Point지지 등으로 다시 세분화 될 수 있으며 모듈러 상부구조의 특성 및 시공환경에 따라 각각의 적합한 방법들로 실제 시공현장에서 적용되고 있다.

(a)Hoist(4-Point)

(b)Rope(2-Point)

Fig. 2 Lifting Methods

2.2 모듈러 교량 구성요소

모듈러 교량은 단위모듈 12m, 16m로 구성이 되어 있으며, 각각의 단위모듈에 대해 Fig 3와 같이 강판, 콘크리트 슬래브, Rope 부재들로 구성이 되있다. 또한 단위모듈의 조합으로 이루어진 40m 조합모듈에 대한 구성요소는 Fig. 4과 같다.

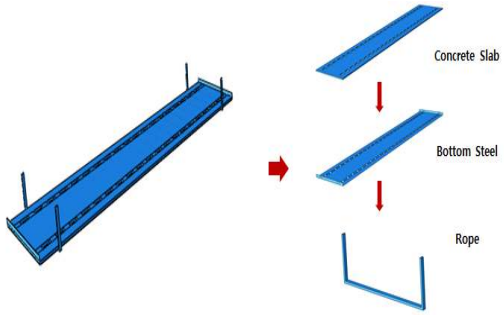


Fig. 3 Components of the Modular Bridge

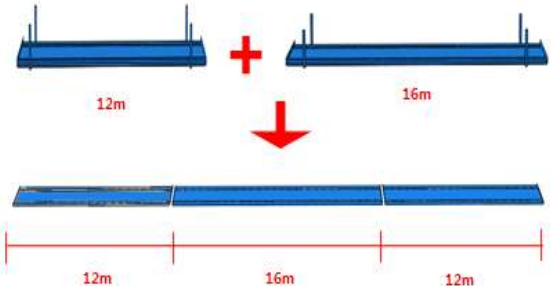
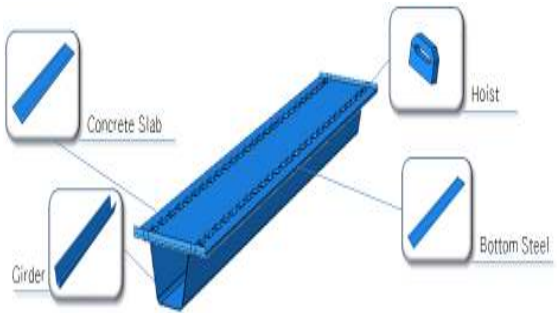


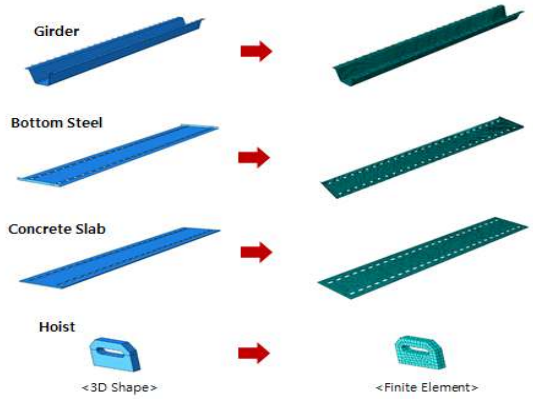
Fig. 4 Fabrication of the Combined Modular Bridge(40m) Composed of the Unit Modules(12m & 16m)

2.3 시공시 체결구(Hoist)를 이용한 이송방법

대상 구조체의 해석에서 실제 운반시공 시 자중에 의한 영향이 가장 클 것으로 생각되는 콘크리트 슬래브의 발생응력과 처짐에 대한 부분을 중점적으로 검토하기 위하여 본 연구에서는 표준 단위모듈 각각의 부재에 대하여 실제 형상과 동일하게 3차원 모델링 하여 이들 단위모듈의 체결구(Hoist)를 이용한 이송방법을 선행연구로 해석 검토를 진행하였다. Fig 5는 단위모듈의 3차원 유한요소 모델링을 보여준다.



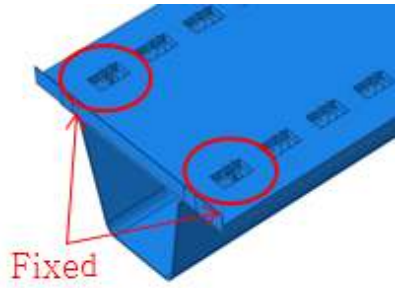
(a) Full Model of a Modular Steel Box Bridge



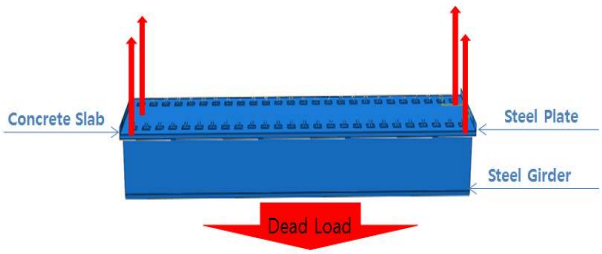
(b) FE Models for Each Component

Fig. 5 FE Modeling For A Modular Bridge

선행연구(2015 전산구조공학회 학술발표 논문)에서 3차원 유한요소 모델링 시 고려된 경계조건의 경우, 콘크리트 슬래브와 강 플레이트 보강재의 경우 초기 설계 및 시공개념을 고려하여 일체 거동 하는 것으로 가정하였으며, 강재 거더와 복합슬래브 사이의 경계조건의 경우 볼트에 의하여 완전부착 된 조립부재로 고려하였다. 체결구(Hoist)를 이용한 이송방법에 따른 경계조건 및 하중조건은 Fig 6과 같다.



(a) Boundary Conditions



(b) Load Conditions

Fig. 6 Load Conditions & Boundary Conditions using Hoist

각각의 Case를 적용시켜 체결구(Hoist)를 이용한 이송방법에 대한 선행연구결과 Fig 7과 같이 12m, 16m 각각의 단위모듈에 대해 Hoist가 설치된 부분의 콘크리트 슬래브에서 국부적집중응력이 발생하는 것을 볼 수 있다.

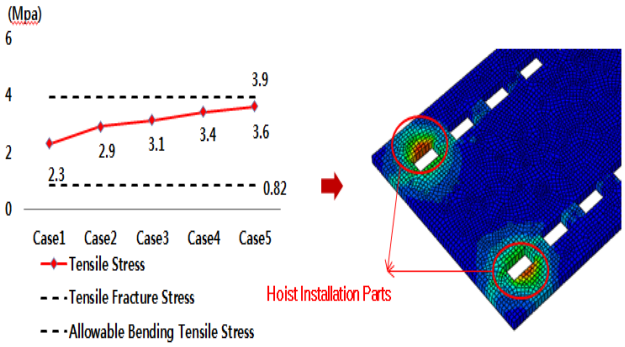
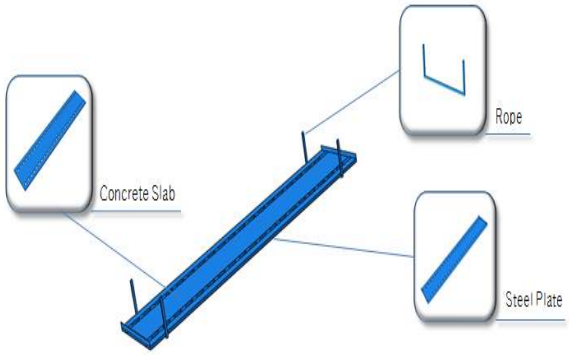


Fig. 7 Local Stress Concentration at Contact Point for a 12m Module Span

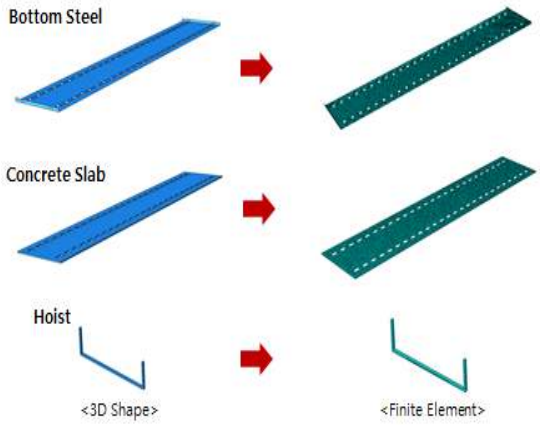
2.4 시공 시 Rope를 이용한 단위모듈 상부구조 해석조건

본 연구에서는 시공 시 체결구(Hoist)를 이용한 이송방법에 따른 해석결과 상대적으로 큰 국부적집중응력이 발생하므로 지간의 상부 구조체 이송 시

체결구(Hoist)를 이용한 방법을 적절하지 않음을 알 수 있다. 그래서 Rope를 이용한 방법을 최적방법으로 고려하여 콘크리트의 균열 및 파괴를 고려하여 강재 거더 거치 후 강 플레이트 와 콘크리트 슬래브에 대하여 안전성 검토를 수행하였다. 실제 형상을 고려한 솔리드(Solid)요소로 각각 3차원 유한요소 모델링 하였으면 Fig 8은 각각의 부재에 대한 모델링 및 유한요소 모델링 형상이다.



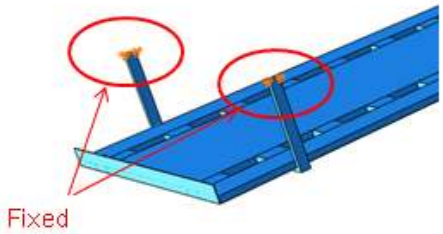
(a) 3D Full Modeling



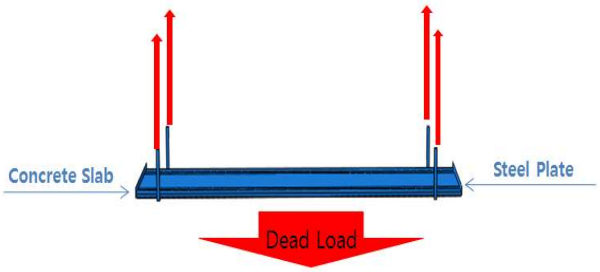
(b) Finite Element

Fig. 8 3-D Modeling & Finite Element Modeling

이송 시 경계조건 및 하중조건은 체결구(Hoist)를 이용한 이송방법에 대한 선행연구와 동일한 개념으로 적용하였으며 Rope를 이용한 이송방법에 대해 적용된 경계조건 및 하중조건은 Fig 9와 같다.



(a) Boundary Conditions



(b)Load Conditions

Fig. 9 Load Conditions & Boundary Conditions

Rope를 이용한 단위모듈 이송방법에 대해 최적 운반조건을 찾기 위해 다양한 조건의 Rope 설치점을 Fig 10과 같이 Case를 나누어 적용하였으며, Rope와 강 플레이트 및 콘크리트의 압착면 작용을 고려하여 Contact Model을 Fig. 11과 같이 적용하여 해석을 수행하였다.

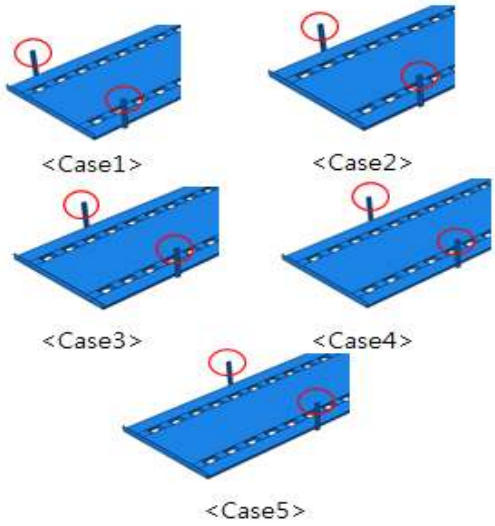


Fig. 10 Analysis Parameters for Case Study

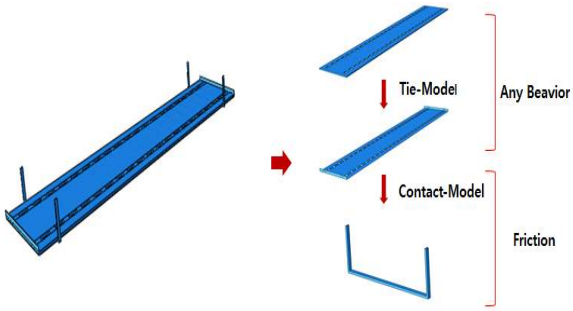
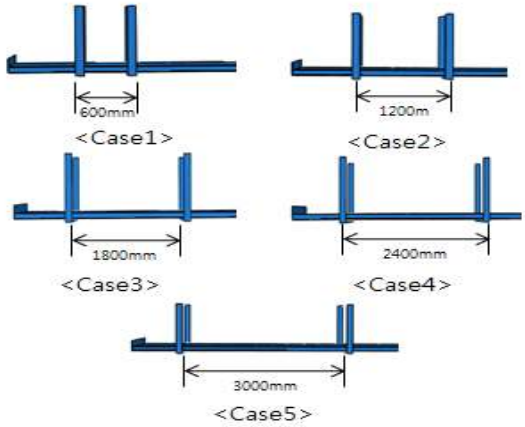
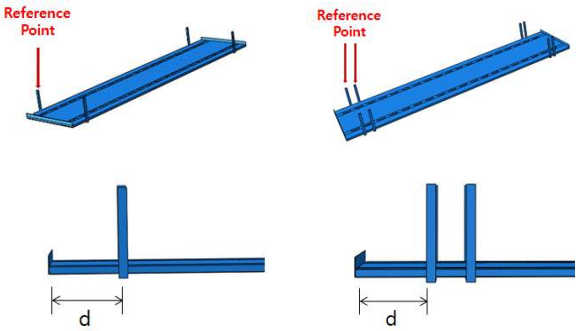


Fig. 11 Application of Interface Contact between Components

또한 본 연구에서는 체결구(Hoist)를 이용한 이송 방법에 대한 선행연구와는 다르게 강재 거더를 포함하지 않기 때문에 단위모듈 상부구조 중앙부에서의 처짐이나 응력은 크게 발생할 것으로 보아 Fig 12와 같이 사용된 Rope의 수에 따라 2단 지지와 4단 지지로 구분하여 연구를 진행 하였으며, 상부구조 끝단의 단부손상 방지를 위한 최소 이격 거리를 두고 해석을 수행하였다.



(a) 4 Rope Lifting Cases



(b) 2 Rope Lifting **(c) 4 Rope Lifting**

Fig. 12 Lifting Methods using Rope

강재와 콘크리트에 사용된 재료 물성치는 Table 1과 같이 주어진다.

Table 1. Material Properties

	Steel	Concrete
Density (t/mm^3)	7.8e-009	2.5e-009
Elastic Modulus(MPa)	205,000	30,891
Poisson's Ratio	0.3	0.17
설계강도 (MPa)	-	40

표준 단위모듈의 사용성 또는 안전성 검토를 위해 강재부재(HSB500)의 경우 2010 도로교 설계기준에 따라 식(1)과 같은 항복응력을 사용하였다.

$$\sigma = 380MPa \tag{1}$$

콘크리트 부재의 경우, 콘크리트 구조설계기준(2010)에 규정된 기준에 따라 콘크리트(40MPa) 허용휨 인장 응력 식(2)를 이용하여 균열의 여부를 판단하였으며, 콘크리트(40MPa) 인장 파괴 응력 식(3)을 이용하여 파괴의 여부를 판단하였다.

$$f_{ta} = 0.13\sqrt{f_{ck}} \tag{2}$$

$$f_r = 0.63\sqrt{f_{ck}} \tag{3}$$

표준이 되는 단위모듈 해석 대상에 대해서 Table 2와 같이 구분하였으며, 각각의 Type의 단위모듈 상부구조의 거동에 대해 중앙부에서의 처짐 및 응력을 비교 검토하였다.

Table 2. Case Study for Different Rope Conditions

Type	Length	Support Conditions
Type1	12m	2 Rope
Type2	12m	4 Rope
Type3	16m	2 Rope
Type4	16m	4 Rope

2.5 시공 시 Rope를 이용한 단위모듈 상부구조 해석 결과

Rope를 이용한 단위모듈의 이송방법에 대한 해석 연구 결과 강 플레이트와 콘크리트 슬래브의 중앙부 처짐의 경우 Fig 13과 같이 당연히 2개의 로프를 사용한 2단 지지일 경우보다 4개의 로프를 사용한 4단 지지일 경우가 처짐의 값이 약 2배정도 작은 값을 나타냈다. 이는 12m 길이의 단위모듈의 경우가 16m 길이의 단위모듈 보다 현저히 작은 값을 나타내는 것을 볼 수 있다. 또한 12m 와 16m 길이의 각각의 단위모듈에 대해서 2단 지지와 4단지지 모두 강 플레이트와 콘크리트 슬래브에서 Case별 중앙부에서의 처짐은 Rope사이의 간격이 좁아짐에 따라 줄어드는 것을 볼 수 있다.

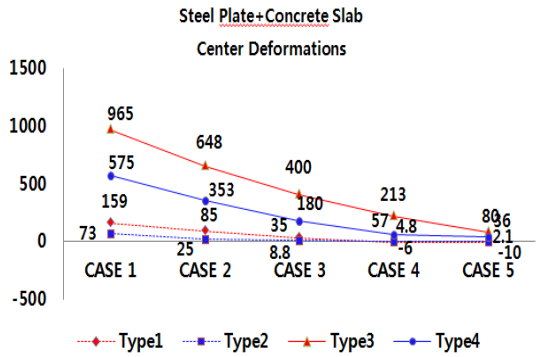
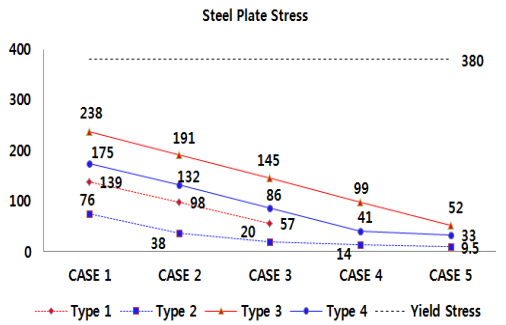
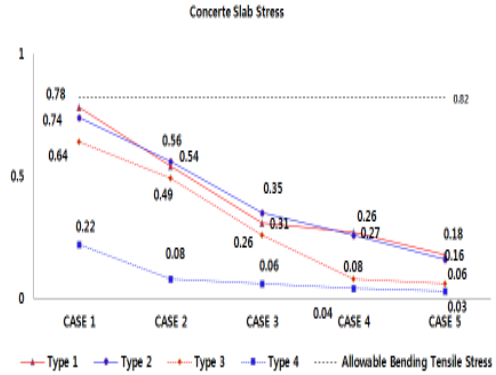


Fig. 13 Deflection of the Modular Span at the Mid-point(Rope)

강 플레이트와 콘크리트 슬래브 중앙부에서 발생하는 응력을 비교 검토 했을 때 Fig 14에 보이듯 2개의 Rope를 사용한 2단지지일 경우보다 4개의 로프를 사용한 4단지지일 경우 응력 값이 더 작게 나타나며 Case별 Rope사이의 간격이 좁아짐에 따라 응력 값이 줄어드는 것을 볼 수 있다. 12m 길이의 경우 16m 길이의 경우보다 더 큰 응력값을 보이기는 하지만 그 값은 큰 차이를 보이지는 않으며 콘크리트 슬래브 중앙부에서 발생하는 응력은 Type별 상당히 작은 값들을 나타내고 있다. 또한 모든 Case에서 강 플레이트와 콘크리트 슬래브 모두 설계기준에 따른 강재의 항복응력(380MPa)과 콘크리트의 허용 휨 인장응력(0.82MPa)을 초과 하지 않는 값을 나타내기 때문에 Rope를 이용한 이송 시 중앙부에서의 거동은 안전할 것으로 보인다.



(a) Steel Plate

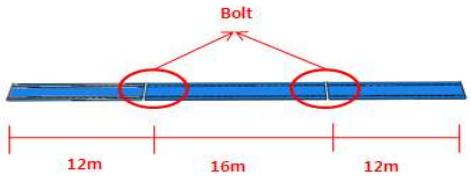


(b) Concrete

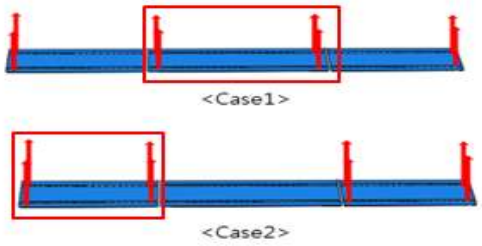
Fig. 14 Stress of the Modular Span at the Mid-point

2.6 시공 시 Rope를 이용한 40m 조합모듈 상부구조 이송방법에 대한 해석 및 검토

본 연구에서는 선행연구와 Rope를 이용한 단위모듈 이송방법에 대한 각각의 연구결과에 기초하여 12m와 16m 단위모듈의 조합으로 이루어진 40m 조합모듈의 시공 시 Rope를 이용한 상부구조 이송방법에 대해 연구를 진행하였으며, 중앙부에서의 처짐과 응력을 검토하여 이송 시 상부구조의 거동에 다른 안전성을 검토하였다. 사용된 재료 물성치 및 경계조건, 하중조건과 안전성 검토에 비교된 설계조건에 대해서 선행연구와 동일한 개념으로 적용시켜 해석을 수행 하였으며 Fig 15(a) 보이는 조합모듈의 연결부는 설계도면에 따라 Bolt접합으로 이는 이송 시 안전할 것으로 가정하여 해석을 수행하였다. Fig 15(b)는 40m 조합모듈의 각각의 해석 Case를 나타내고 있다.



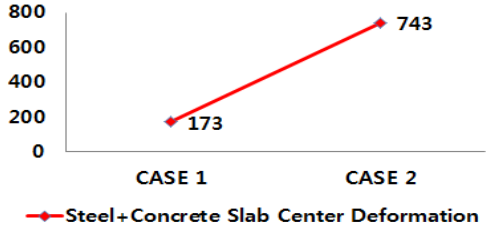
(a) Modular Connection



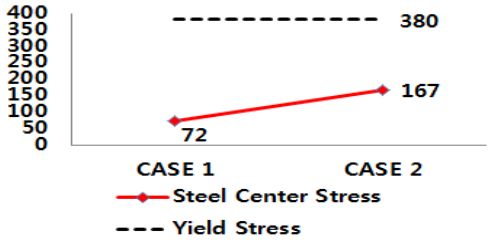
(b) Boundary Condition for Lifting Method

Fig. 15 Lifting Analysis Mathod Considering the Module Connection

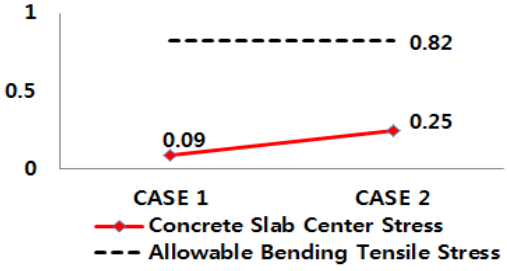
Fig 16에 보이듯 강재와 콘크리트 중앙부에서 발생된 처짐과 응력을 비교할 때 각각의 이송 CASE별 구조 안전성의 경우 40m 조합모듈 이송 시 CASE 1에 의한 이송방법이 CASE 2에 의한 이송방법 보다 더 안전할 것으로 판단된다.



(a) Center Deformation of Steel Plate and Concrete Slab



(b) Stress of Steel Plate



(c) Stress of Concrete Slab

Fig. 16 Results of Analytical Study

3. 결 론

본 연구에서는 강재 거더를 포함하지 않은 40m 조합모듈 상부구조에 대하여 체결구(Hoist)를 이용한 이송방법은 선행연구 결과 체결구(Hoist)가 연결된 부분의 콘크리트에서 국부적 응력집중이 발생하기 때문에 예상되는 콘크리트의 균열 및 파괴를 고려하여 강재 거더를 포함하지 않은 조합모듈 상부구조에 대해 Rope를 이용한 이송 시 발생하는 구조체의 거동에 관한 연구를 진행하였다.

○ Rope를 이용한 이송방법에 대한 12m와 16m 각각의 단위모듈에 대해 연구결과 단위모듈 상부구조 중앙부에서 발생하는 처짐과 응력 값은 Rope의 개수에 따라 2단지지와 4단지지의 구분에서 4단지지의 경우 더 작게 나타났으며 Rope사이의 간격이 줄어듬에 따라 처짐과 응력 값이 줄어드는 것을 볼 수 있다. 또한 모든 해석 Case에 대해 비교 분석한 강재의 항복응력과 콘크리트의 허용 휨 인장응력을 넘지 않는 값을 나타내기 때문에 단위모듈 상부구조의 시공 시 이송에 대해 안전한 것으로 보인다.

○ 각각의 단위모듈의 조합으로 이루어진 40m 조합모듈의 해석결과 적용된 2가지의 Case에 대하여 중앙부에서의 처짐과 응력을 검토했을 때 강재의 항복응력과 콘크리트의 허용 휨 인장응력을 넘지 않는 값을 나타내기 때문에 이송 시 전체 거동은 안전할 것으로 보이며, Case 1의 경우가 처짐과 발생하는 경우 응력에서 더 작은 값을 나타내므로 Case 1의 경우가 더 안전할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 건설기술연구사업의 연구비지원(10기술혁신 B01-직선교량의 공사기간 단축을 위한 표준모듈 활용 조립식 교량 기술 개발연구단)과 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2011-0028531)

References

ABAQUS Theory and user's manual. Pawtucket (Rhode Island. USA): Hibbitt, Karlsson, and Sorensen lnc. ; 2011
Highway Bridge Design Codes (2010).
Concrete Structure Design Codes (2007).
Steel Highway Bridge Detail Design Code (2006).

C. Miki. et al. (2002), "High Strength and High Performance Steels and Their Use in Bridge Structures" *Journal of Constructional Steel Research* 58. pp. 3-20.

Culmo.M, Snyer,D. "Modular Steel Bridge Technologies", 2010 FHWA Bridge Conference Proceeding

Jung, W. Y. (2015), An Analytical Study for Safety Evaluation of Modular Bridge Super-Structures Based on Transportation and Lifting Methods.

Ji, H. S. (2010), "Structural Performance of an Advanced Composites Bridge Superstructure for Rapid Installation," *J. Korean Soc. Adv. Comp. Struc.* Vol. 1, No.1, pp. 34-45.

Kim, H. Y., Jeong, Y. J. (2009), "Steel-Concrete Composite Bridge Deck Slab With Profiled Sheeting," *Juournal of Constructional Steel Research*, 65(8), 1751-1762.

Kwon, M. H. and Jung, W. Y. (2012), "Comparison of Improved Explicit Method and Predictor Correct α -Method," *J. korean Soc. Adv. Comp. Struc*. Vol. 3, No. 4, pp. 1-9.

Lee, S. Y., Jung, W. Y., Chang, S. Y. (2014), "Buckling Analysis of a Orthotropic Rectangular Plates − Local Buckling-," J. korean Soc. Adv. Comp. Struc. Vol. 5, No. 4, pp. 12-15.