



온도하중과 인양하중에 영향을 받는 모듈러 도로 슬래브 수직연결부의 상세해석

김우석¹⁾ · 남정희²⁾ · 민근형³⁾ · 김경진⁴⁾ · 이재하^{5)*}

¹⁾충남대학교 토목공학과 ²⁾한국건설기술연구원 ³⁾충남대학교 토목공학과

⁴⁾한국해양대학교 토목환경공학과 ⁵⁾한국해양대학교 건설공학과

Detailed Analysis of Vertical Connector in Modular Roadway Slab Under Temperature and Lifting Loading

WooSeok Kim,¹⁾ Jeonghee Nam,²⁾ Geunhyeong Min,³⁾ Kyeongjin Kim,⁴⁾ and Jaeha Lee^{5)*}

¹⁾Dept. of Civil Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Rep. of Korea

²⁾Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang 10223, Rep. of Korea

³⁾Dept. of Civil Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Rep. of Korea

⁴⁾Dept. of Civil and Environmental Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Rep. of Korea

⁵⁾Dept. of Civil Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Rep. of Korea

ABSTRACT In terms of bridge construction, the concrete deck slab is weak members compared to beam members of the bridge supports. Deck slabs must be sound to support and distribute vehicle loads. If slabs are not enough to support the loads, it should be replaced. Bridge deck replacement has been an important industry over the world since the construction is simplified to shorten construction time and to save construction costs. Slab module provides a quickly, easily and reliably construction method in order to avoid high cost and minimum traffic disruption. in addition, slab module shows high reliability since they are factory products. However, slab module should be considered in the performance under various loads. In this study, structural analysis is performed to evaluate the performance of slab module under vehicle loads and temperature loads. Spiral rebar is also utilized around the vertical joints to improve the structural integrity under the lifting loads. In order to confirm the weak area of slab module for the lift condition, numerical analysis has been performed.

Keywords : slab module, structural analysis, vertical joint, vehicle load, temperature load, lifting

1. 서 론

교량이나 도로의 손상 발생 시 복구는 이용자의 편의뿐만 아니라 사회적으로도 많은 영향을 끼친다. 일례로 Lee et al.¹⁾ 연구에 따르면 2010년 발생한 서울외곽순환고속도로 부천고가교 화재사고로 일평균 23만대의 차량이 정체와 통행 제한이 예상되었으나 4개월의 공사기간을 1개월 단축하여 교통정체를 줄일 수 있었다. 이처럼 교량이나 도로의 교체에 드는 시간적 손실을 줄이는 것으로 인해 많은 사회적 비용을 줄일 수 있으며, 이에 따라 현재 전 세계적으로 교량이나 도로의 조기 복구와 교체에 많은 관심을 가지고 있다.

교량에서 손상이 가장 많이 되는 부분은 차량의 동적하중이 직접적으로 전달되는 슬래브이고, 실제 슬래브에 손상이 가해져 보수하는 경우는 매우 빈번하게 발생한다. 이 때 교량의 보수, 보강 및 교체를 위한 통행제한에 의해 막대한 시간적 비용이 발생하게 되는데, 슬래브를 포함한 모든 부재는 공장에서 주문 제작되어 현장에서 하부기초 또는 크로스빔과 수직연결부를 이용하여 연결하는 비교적 교체가 간편하고 급속시공이 가능한 모듈러 도로 슬래브(Fig. 1)를 사용할 경우 공기 단축으로 인한 사회적 비용 손실의 감소를 기대할 수 있다. 또한 모듈러 도로 슬래브는 공장에서 제작되기 때문에 구조물의 신뢰성 또한 매우 향상된다고 할 수 있다. 이러한 이유로 현재 국내외로 모듈러 도로 슬래브에 대한 많은 연구가 진행 중에 있다.^{2,3)}

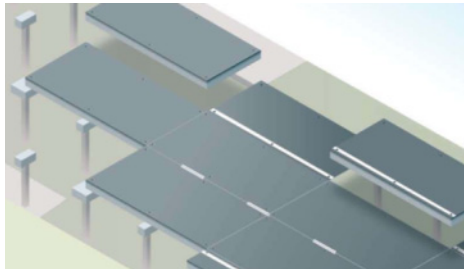
모듈러 도로 슬래브는 사용 시 여러 하중에 대하여 연결부에 응력집중이나 과도한 변위가 발생할 수 있다. 특히 인양 시에는 수직연결부를 이용하여 인양할 것으로 계획되

*Corresponding author E-mail : leonlee397@gmail.com

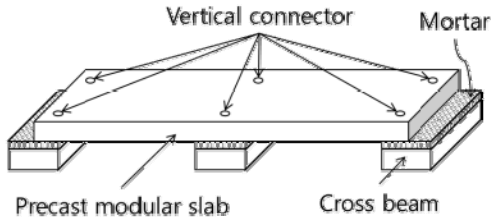
Received June 23, 2015, Revised August 17, 2015,

Accepted July 26, 2016

©2016 by Korea Concrete Institute



(a) Conceptual diagram of modular slab



(b) Schematic diagram of modular slab

Fig. 1 Conceptual diagram and schematic diagram of modular slab

로 수직연결부 홀(Hole) 주변으로 응력집중이 발생하게 되어 이러한 하중에 대하여 고려가 필요하다.

본 연구에서는 자중, 온도하중, 온도경사하중과 차량하중에 대하여 영향을 받는 모듈러 도로 슬래브의 구조해석을 실시하여 모듈러 도로 슬래브와 수직연결부에 발생하는 응력 및 변위를 확인하였다. 인양 시 발생하는 슬래브모듈과 수직연결부의 집중응력 및 변위에 대해서도 확인하였다. 인양 시에는 3개의 수직연결부를 이용하여 인양하는 방법과 6개의 수직연결부를 이용하여 인양하는 방법을 비교분석하여 경제성과 안전성이 동시에 고려될 수 있는 인양방법을 제시하였다.

2. 해석 모델

2.1 슬래브의 설계

모듈러 도로 슬래브 사용 시 발생할 수 있는 하중에 대하여 Midas Civil 2012+을 이용하여 구조해석 및 단면 설계를 실시하였다. 차량하중은 영향선 분석결과 도로교설계기준⁴⁾에 제시되어 있는 표준트럭하중(KL-510)에서 가장 큰 하중인 192 kN만을 적용하여 재하 하였다. 고려한 모듈러 도로 슬래브 중 가장 긴 길이가 9 m로 AASHTO LRFD⁵⁾에서 제시한 연행 차량 간 거리보다 짧아 연행하중은 적용하지 않았다. 온도하중은 도로포장구조 설계 해설서⁶⁾에 제시되어 있는 실측 데이터 중 최고/최저값을 선택하여 제시하였으며 자세한 사항은 다음 장에서 설명하였다. 슬래브의 길이는 운반가능 무게와 크기를 고려하여 8 m, 9 m인 두 가지 경우에 대하여 설계를 실시하여 최적 설계안을 선정하였다. 특히, 수직연결부의 경우 이전의 연구결과⁷⁾를 기초로 수직연결부에 작용하는 전단력을 기초로 하여 설계하였다. 구조물에 자중과 차량하중, 조합하중을 적용한 결과 배력철근, 온도

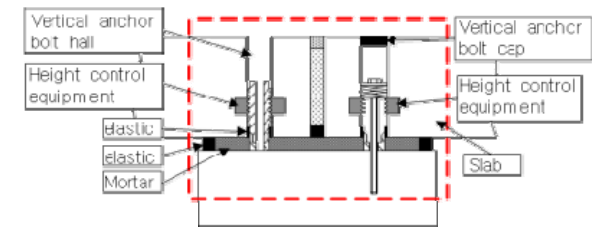
Table 1 Designed Slab

		Case L8	Case L9
Main Reinforcement of Positive Moment	Reinforcement	D19	D19
	Spacing (mm)	200	180
	Amount of reinforcement (mm ²)	1433	1592
Main Reinforcement of Negative Moment	Reinforcement	D19	D19
	Spacing (mm)	200	180
	Amount of reinforcement (mm ²)	1433	1592
Distribution bar	Reinforcement	D13	D13
	Spacing (mm)	200	200
	Amount of reinforcement (mm ²)	634	634

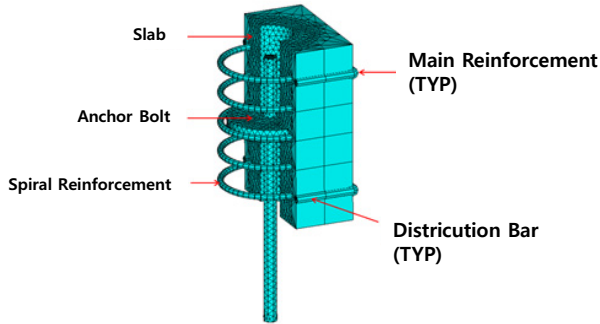
철근, 균열, 처짐에 대하여 모두 안전한 것으로 확인되었다. 최종적으로 산출된 최적설계안은 Table 1에 나타나있다.

2.2 슬래브모듈의 모델링

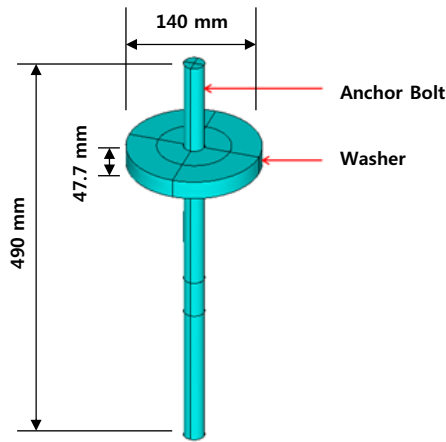
슬래브는 2경간이며 길이는 8 m와 9 m를 고려하였다. 슬래브 길이가 긴 9 m가 경제적이거나 수직연결부의 거동이 만족스럽지 못할 경우를 대비하여 8 m 길이의 슬래브도 함께 확인하였다. 해석은 ANSYS APDL⁸⁾을 이용하여 3차원 10절점 사면체요소(SOLID185)를 사용하여 슬래브와 모르타르, 그리고 크로스빔을 모델링 하였고 각각 압축강도 50 MPa로 설정하였다. 철근은 3차원 트러스(BEAM188) 요소를 사용하였으며 항복강도는 400 MPa를 사용하였다. 수직연결부가 매립되어 있는 부근에 나선철근으로 보강을 한 모델의 경우 _WR (With reinforcement), 나선철근으로 보강을 하지 않은 경우 _WOR (Without reinforcement)로 표기하여, 9 m와 8 m 모델을 각각 매립부에 나선철근 보강을 한 모델을 Case L9_WR, Case L8_WR, 매립부에 나선철근 보강을 하지 않은 모델을 Case L9_WOR, Case L8_WOR로 구분하여 표기하였다. 수직연결부의 모델링을 Fig. 2에 나타냈으며, 해석 시 수직연결부와 상부 슬래브는 절점을 공유를 하여 일체적으로 거동하도록 하였다. 그러나 매립부에서의 수직연결부는 상부와 하부가 따로 거동하기 때문에 이 부분에서의 인장응력은 고려하지 않았다. 철근은 주철근 D19, 배력철근 D16, 종방향 온도철근 D19를 사용하였고 나선철근은 D10 철근을 사용하였으며, 나선철근의 피치는 50 mm, 나선의 반경은 160 mm로 하였다. 나선철근 모델링 시 나선의 형태로 하게 될 경우 element가 균일하지 않으므로 원형으로 단순하게 표현하였다. 실제 나선형태가 해석에 어떠한 영향을 주는지 평가하기 위한 추가해석을 수행하였다. 3차원 10절점 사면체 요소(C3D10)을 이용하여 콘크리트 및 강재를 모델링하였으며 철근은 3차원 트러스 요소를 사용하였다. 콘크리트



(a) Schematic diagram of vertical joint



(b) Vertical joint model



(c) Detail of vertical joint

Fig. 2 Modeling of vertical joint

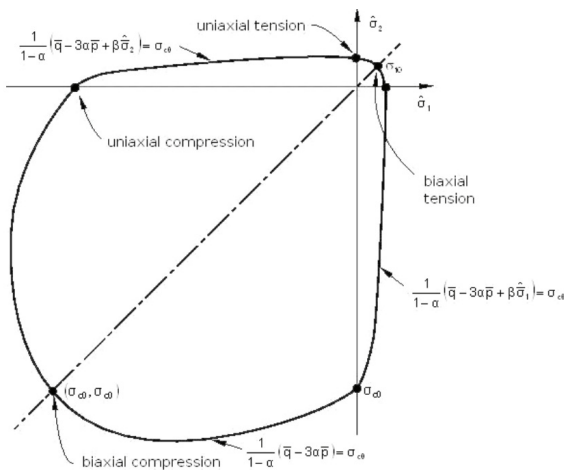


Fig. 3 Yield surface in plane stress (Lee and Fenves, 1998)

트의 재료모델에는 압축강도 50 MPa의 Concrete Damage Plasticity Model⁹⁾을 사용하였으며, Fig. 3에는 Damage Plasticity Model의 파괴면 설정에 대하여 나타냈다. 콘크리트의 인장강도 및 파괴에너지는 CEB-FIP¹⁰⁾에서 제시한 식을 참조하

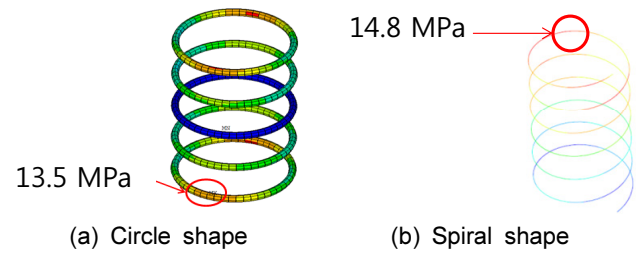


Fig. 4 Stress of circle shape and spiral shape

Table 2 Material properties

	Elastic Modulus (GPa)	Poisson's Ratio	Strength (MPa)	Mass (kg/m ³)
Slab	36.6	0.18	50	2500
Mortar	18.5	0.18	50	2150
Cross Beam	36.6	0.18	50	2500
Anchor Bolt and Reinforcement	200	0.3	400 (Yield Strength)	7850

였다. 강재의 재료모델에는 Elasto-Plastic 모델을 사용하였으며 항복강도는 일반적인 400 MPa로 가정하였다. 인양조건에서 극심한 조건인 3개의 수직연결부 인양 시 나선철근에 작용하는 최대 인장응력은 14.79 MPa(Fig. 4)인 것으로 확인되어 원형의 경우(13.5 MPa)와 유사한 것으로 나타났다. 따라서 나선철근의 원형 모델은 해석상 큰 영향을 미치지 않는 것으로 확인되었다. 모델링에 사용된 슬래브 각 재료별 물성치는 Table 2에 제시하였다.

2.3 하중적용

본 논문에 적용된 하중은 구조물의 자중, 차량하중, 온도하중이며, 온도하중은 하절기와 동절기의 경우를 고려하였다. 하절기에는 상부의 온도가 높고 하부의 온도가 낮으며 동절기에는 반대로 상부의 온도가 낮고 하부의 온도가 높아 상하부의 온도차가 클 경우 변위와 모멘트가 크게 발생하여 하절기와 동절기에 가장 큰 모멘트가 발생하게 된다. 적용된 온도는 도로포장구조 설계 해석서⁶⁾에서 제시되어 있는 값을 사용하였으며, 하절기에는 상부 46.5°C 하부 2.9°C, 동절기에는 상부 -4.5°C 하부 4.0°C를 적용하였다. 여름에는 오른쪽 경간에 차량하중을 재하 하여 왼쪽 경간이 상승하도록 하였고, 겨울에는 왼쪽 경간에 차량하중을 재하 하여 왼쪽 경간이 처지는 형태가 되도록 하여 최대모멘트가 발생하게 하였으며, 온도하중과 차량하중을 조합하여 해석에 적용하였다.

2.4 인양시 구조해석

모듈러 도로 슬래브는 공장타설 철근콘크리트로서 현장 인양시 자중으로 인해 슬래브에 처짐과 응력집중 등이 발생

하게 된다. 따라서 인양 시 슬래브에 발생하는 영향을 확인하기 위해 수직연결부 상부에 경계조건을 적용하여 인양 조건에 대한 해석을 수행하였다. 인양은 수직연결부 3개 지점에 인양 볼트를 체결한 경우와 6개 지점에 인양 볼트를 체결한 2가지 경우를 해석하였으며 수직연결부 부근의 나선철근의 유무에 대해서도 비교하였다. 수직연결부의 설치부분을 Fig. 5에 나타냈다. 시공성 향상을 위해 ①번, ③번, ⑤번 3개의 수직 연결부를 이용하여 인양하였으며 이에 대한 구조 해석을 수행하였다.

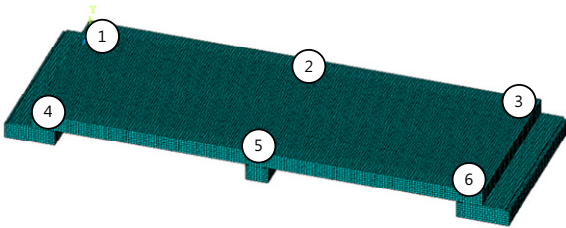


Fig. 5 Installed vertical joints locations

3. 해석 결과

3.1 차량하중과 온도하중 적용모델의 해석결과

8 m 슬래브의 해석결과를 Table 3에 나타내었다. 하절기의 해석결과를 확인해보면, 하절기에 8 m 슬래브의 최대 처짐량은 Fig. 6과 같이 왼쪽 경간의 측면에서 발생하였다. Case L8_WOR 은 0.754 mm, Case L8_WR 은 0.754 mm로 동일한 처짐량을 보여 철근의 매입유무에 대한 차이를 나타내지 못하였다. 수직연결부의 최대 응력은 Fig. 7과 같이 ④번 수직 연결부에서 발생하였으며, Case L8_WOR과 Case L8_WR 모두 612 MPa로 항복응력 400 MPa을 넘어 항복하는 것으로 나타나 수직 연결부에 추가적인 보강이 필요한 것으로 확인되었다. 슬래브의 철근이 받는 최대 응력은 최대 처짐이 발생하는 지점에서 발생하였으며, Case L8_WOR과 Case L8_WR 모두 20.6 MPa로 나타나 나선철근의 영향이 없는 것으로 확인되었다. 슬래브에 발생하는 1차 최대 주응력은 최대응력이 발생하는 ④번 수직연결부가 있는 슬래브에서 최대 1차 주응력이 발생하였으며, Case L8_WOR 과 Case L8_WR 슬래브에서는 모두 2.61 MPa로 나타나 나선철근의 영향이 거의 없는 것을 확인하였다. 모르타르에 발생하는 최대 1차 주응력은 오른쪽 경간인 ⑥번 수직연결부 부근에서 발생하였으며, Case L8_WOR과 Case L8_WR 모두 33.9 MPa로 나타나 항복하는 것으로 확인되어 콘크리트에 발생하는 균열확인을 위한 추가적인 해석(Damage plasticity model 사용)을 수행하였다. 균열해석 수행 결과 미소한 균열이 발생하였으나 극심한 하중하에서 콘크리트 구조물에 미소하게 발생하는 균열은 무시할만한 수준으로 판단된다. 크로스빔의 최대 응력은 ④번 수직연결부 부근에서 발생하였고 Case L8_WOR과 Case L8_WR 모두 4.39 MPa로 나타났다. 나선철근의 최대 응력은 ②번 수직연결부 매립부에서 발생하였으며 최대

Table 3 Obtained results from 8m slab due to temperature loading

	Summer		Winter	
	Case L8_WOR	Case L8_WR	Case L8_WOR	Case L8_WR
Slab Deflection (mm)	-0.754	-0.754	-1.74	-1.74
Vertical Joint Stress (MPa)	612 > f_y	612 > f_y	483 > f_y	483 > f_y
Reinforcement Stress (MPa)	20.6	20.6	23.0	23.0
First Principal Stress of Slab (MPa)	2.61 < f_r	2.61 < f_r	12.1 > f_r	12.1 > f_r
Mortar Principal Stress (MPa)	33.9 > f_r	33.9 > f_r	37.7 > f_r	37.7 > f_r
Cross beam Principal Stress (MPa)	4.39 < f_r	4.39 < f_r	17.1 > f_r	17.1 > f_r
Spiral Reinforcement Mises Stress (MPa)	-	8.63	-	22.6

$$f_r = 0.63 \sqrt{f_{ck}} = 4.45 \text{ MPa},$$

$$f_y = 400 \text{ MPa}$$

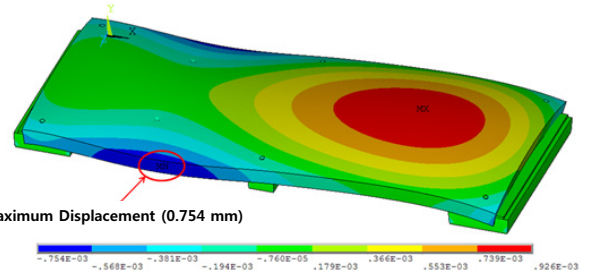


Fig. 6 Case L8_WOR maximum deflection (summer)

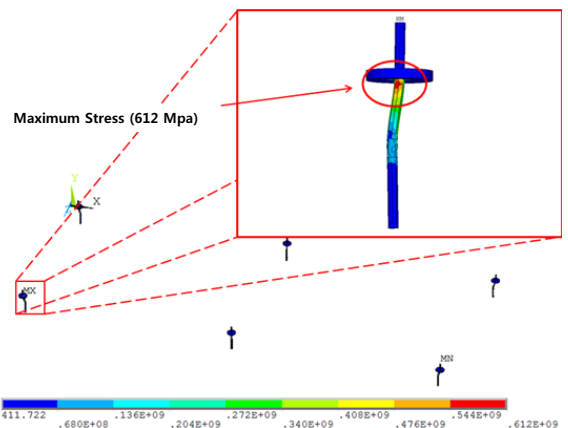


Fig. 7 Case L8_WOR maximum stress of vertical joints (summer)

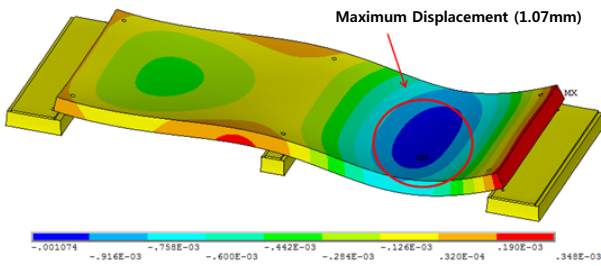


Fig. 8 Case L8_WR maximum deflection (winter)

응력은 8.63 MPa를 나타냈다. 이와 같이 수직연결부의 나선 철근 매입 유무는 취약부 보강에 큰 효과가 없는 것으로 판단된다. 이는 집중하중(인양하중)에 대해서는 나선철근이 효과적으로 작용하나 전체 거동(온도하중 및 차량하중)에서는 나선철근의 강성이 전체 구조물 강성 대비 기여하는 바가 미소하기 때문인 것으로 판단된다.

동절기의 해석결과를 확인하면, 8 m 슬래브에서 발생하는 최대 처짐량은 1.74 mm로 Fig. 8과 같이 오른쪽 경간 가운데에서 발생하였다. 수직연결부의 최대 응력은 Case L8_WOR은 ⑤번 수직연결부에서, Case L8_WR은 하절기와 같은 위치인 ④번 수직연결부에서 발생하였으며, 최대응력은 모두 483 MPa로 허용응력을 초과하여 추가적인 보강이 필요한 것으로 판단된다. 철근의 최대 응력은 중앙 지점인 ⑤번 수직연결부 부근에서 발생하였으며 Case L8_WOR과 Case L8_WR 모두 23 MPa로 하절기와 비교하여 낮은 응력을 발생시켰다. 슬래브의 최대 1차 주응력은 ②번 수직연결부 부근에서 발생하였고, Case L8_WOR과 Case L8_WR 모두 12.1 MPa로 나타나 하절기대비 463% 더 높은 응력이 발생하여 슬래브의 휨인장강도인 4.45 MPa를 초과하였다. 이는 해석에서 수직연결부와 매립부의 노드 공유로 인하여 수직연결부 상부의 인장력을 고려하지 않았기 때문인 것으로 판단된다. 모르타르의 최대 1차 주응력은 왼쪽 경간의 ①번 수직연결부 부근에서 발생하였으며, Case L8_WOR과 Case L8_WR 모두 37.7 MPa로 항복하는 것으로 나타났으나 앞서 설명한 바와 같이 미소한 균열로 확인되어 무시할 만한 수준이라 판단된다. 크로스빔의 최대 1차 주응력은 하절기와 대칭이 되는 ④번 수직연결부 부근의 하부에서 발생하였으며, Case L8_WOR과 Case L8-WR 모두 17.1 MPa로 나타나 하절기대비 389% 증가된 응력을 발생시켰다. 이러한 증가된 현상은 하절기에는 수직연결부에 응력이 집중되었으나 동절기에는 응력이 집중되지 않고 크로스빔이 변형에너지를 흡수하였기 때문으로 판단된다. 나선철근의 최대 응력은 ⑤번 수직연결부의 나선철근에서 22.6 MPa 발생하였으며 이는 하절기에 발생하는 나선철근의 최대 응력에 비해 261% 증가된 것으로 나타났다. 8 m 길이의 모듈러 도로 슬래브를 종합해 보면 하절기에는 수직연결부에 많은 응력이 집중되었으나, 전체적으로 동절기에 더욱 취약한 것으로 나타났다.

9 m 슬래브의 해석 결과를 Table 4에 나타냈다. 하절기의 해석결과를 살펴보면, 최대 처짐은 ①번과 ②번 수직연결부 사이에서 나타났으며 Case L9_WOR과 Case L9_WR 모두

Table 4 Obtained results from 9 m slab due to temperature loading

	Summer		Winter	
	Case L9_WOR	Case L9_WR	Case L9_WOR	Case L9_WR
Slab Deflection (mm)	-0.598	-0.598	-1.07	-1.07
Vertical Joint Stress (MPa)	503 > f_y	503 > f_y	378 < f_y	378 < f_y
Reinforcement Stress (MPa)	28.4	28.4	20.3	20.3
First Principal Stress of Slab (MPa)	3.39 < f_r	3.40 < f_r	3.58 < f_r	3.59 < f_r
Mortar Principal Stress (MPa)	86.7 > f_r	86.7 > f_r	68.3 > f_r	68.3 > f_r
Cross beam Principal Stress (MPa)	13.2 > f_r	13.2 > f_r	17.2 > f_r	17.2 > f_r
Spiral Reinforcement Mises Stress (MPa)	-	10.9	-	13.4

$$f_r = 0.63 \sqrt{f_{ck}} = 4.45 \text{ MPa},$$

$$f_y = 400 \text{ MPa}$$

처짐이 0.598 mm 발생하여 나선 철근의 영향은 없는 것으로 확인되었다. 수직연결부의 최대 응력이 발생하는 위치는 오른쪽 경간 ⑥번 수직연결부에서 8 m 경관과는 상이함을 보였으며 최대 응력은 Case L9_WOR과 Case L9_WR 모두 503 MPa로 수직연결부의 허용응력을 초과하여 보강이 필요한 것으로 판단된다. 철근의 최대 응력은 Fig. 9와 같이 차량하중을 재하 하는 지점에서 발생하였으며 최대 응력은 Case L9_WOR과 Case L9_WR 모두 28.4 MPa로 나타났다. 슬래브에 발생하는 최대 1차 주응력은 ②번과 ⑤번 수직연결부 사이에 Case L9_WOR는 3.99, Case L9_WR는 3.4 MPa이 발생하여 나선철근이 없는 경우 더 작게 나타났으나, 구조물의 최대 휨인장강도인 4.45 MPa는 모두 넘지 않아 구조건전성은 유지하는 것으로 확인되었다. 모르타르의 최대 1차 주응력은 8 m 길이와 동일한 위치인 오른쪽 경간 ⑥번 수직연결부 부근에서 Case L9_WOR과 Case L9_WR 모두 86.7 MPa로 나타나 항복하였으나, 미소한 균열발생으로 무시할 수 있는 수준으로 판단된다. 크로스빔의 최대 1차 주응력은 하절기와는 다른 ③번 수직연결부 부근에서 발생하였으며 크기는 Case L9_WOR과 Case L9_WR 모두 13.2 MPa로 나타나 모두 항복하였다. 나선철근의 응력은 길이 8 m 경간과는 다르게 ③번 수직연결부의 나선철근에서 10.9 MPa 발생하였다.

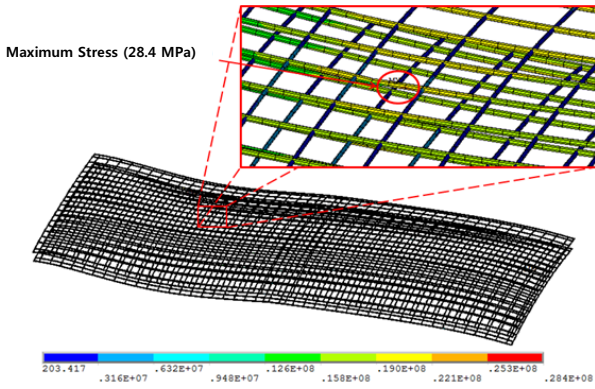


Fig. 9 Case L9_WOR maximum stress of reinforcement (summer)

9 m 슬래브 동절기의 해석결과를 보면, 슬래브 최대 처짐은 오른쪽 경간의 중앙부에서 L9_WOR과 Case L9_WR 모두 1.07 mm로 나타났다. 수직연결부의 최대 응력은 Case L9_WOR과 Case L9_WR 모두 ①번 수직연결부에서 378 MPa로 같은 길이일 경우 나선철근의 매입 유무와 상관없이 동일하게 나타나 나선철근 매입에의 효과적인 강성증대는 기대할 수 없었다. 한 슬래브의 최대 1차 주응력은 모두 슬래브의 중간에서 나타났으며, Case L9_WOR에서 3.58 MPa, Case L9_WR에서 3.59 MPa로 모두 ⑥번 수직연결부에서 발생하였다. 나선철근이 매입된 경우 슬래브에서 발생하는 최대 1차 주응력이 소폭 증가하였으나 구조물의 휨인장강도는 초과하지 않아 구조물의 건전성은 유지하는 것으로 확인되었다. 모르타르의 최대 1차 주응력은 ①번 수직연결부 부근에서 발생하였으며 Case L9_WOR과 Case L9_WR 모두 68.3 MPa로 나타나 나선철근의 매입 유무에 따른 응력 저감은 효과적이지 않는 것으로 확인되었다. 크로스빔의 최대 1차 주응력은 Case L9_WOR과 Case L9_WR 모두 ①번 수직연결부 부근에서 발생하였으며 17.2 MPa로 나타났으나 구조건전성을 저해하지 않는 미소균열로 확인되었다. 나선철근의 최대 응력은 ⑤번 수직연결부에 매입된 나선철근에서 13.4 MPa로 하절기 대비 23% 증가하였으나 나선철근의 항복응력은 초과하지 않아 구조물의 구조건전성은 저해하지 않는 것으로 나타났다.

3.2 인양하중에 따른 수직연결부 구조해석 결과

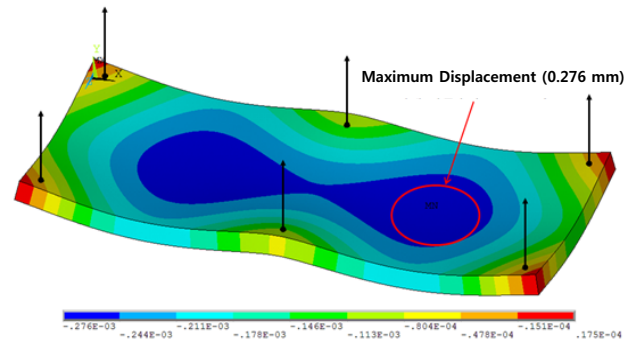
8 m 슬래브의 인양 시 거동 결과를 Table 5에 정리하였다. Case L8_WOR 인양 시 6개 수직연결부를 사용하여 인양할 나선철근의 매입 유무와의 상관없이 오른쪽 경관에서 최대 처짐 0.276 mm, 3개 수직연결부의 나선 철근의 매입 유무와는 상관없이 모두 ②번 수직연결부 부근에서 최대 처짐 1.35 mm가 발생(Fig. 10)하여 나선철근의 매입에 따른 처짐량 감소효과는 없는 것으로 확인되었다. 수직연결부에 발생하는 응력은 나선철근의 유무와 사용된 수직연결부 수와 상관없이 모두 ⑤번 수직연결부에서 발생하였다. 6개의 수직연결부를 사용하여 인양할 경우 앵커볼트에서 182 MPa, 와서

Table 5 Obtained results from 8 m slab due to liftinf loading

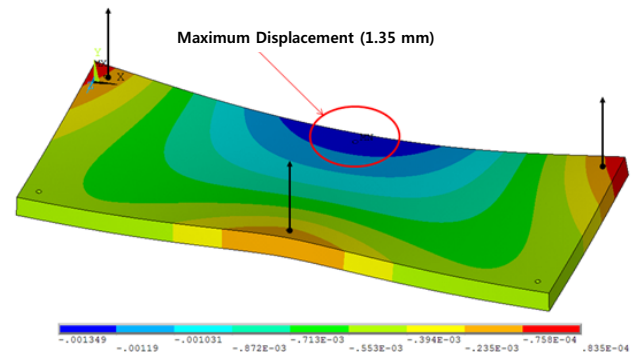
	Six Vertical Joints		Three Vertical Joints	
	Case L8_WOR	Case L8_WR	Case L8_WOR	Case L8_WR
Slab Displacement (mm)	-0.276	-0.276	-1.35	-1.35
Vertical Joint Stress (MPa)	182 / 101 < f_y	182 / 101 < f_y	335 / 172 > f_y	335 / 172 < f_y
Reinforcement Stress (MPa)	6.14	6.03	12.4	12.2
First Principal Stress of Slab (MPa)	Tension 3.04 < f_r	Tension 3.04 < f_r	Tension 4.97 > f_r	Tension 4.97 > f_r
Axial Stress of Slab (MPa)	Tension 2.94 < f_r	Tension 2.95 < f_r	Tension 5.35 > f_r	Tension 5.35 > f_r
Stress of Slab Depth (MPa)	Tension 12.3 > f_r	Tension 1.73 < f_r	Tension 22.0 > f_r	Tension 3.10 < f_r
Stress of Slab Width (MPa)	Tension 0.96 < f_r	Tension 0.96 < f_r	Tension 1.50 < f_r	Tension 1.51 < f_r
Reinforcement Stress (MPa)	N.A.	5.84	N.A.	11.7

$$f_r = 0.63 \sqrt{f_{ck}} = 4.45 \text{ MPa},$$

$$f_y = 400 \text{ MPa}$$



(a) Maximum displacement using six vertical joints



(b) Maximum displacement using three vertical joints

Fig. 10 Case L8_WOR maximum displacement of slab

에서 101 MPa로 항복응력 대비 83.8%와 45.5%이며, 3개 수직 연결부를 사용하여 인양할 경우 앵커볼트에서 335 MPa, 와서에서 172 MPa이 발생하여 항복응력 대비 95.8%와 52.8%로 나타났다. 또한 3개 수직 연결부를 사용할 경우 6개의 수직 연결부를 사용할 경우보다 최대 응력이 184% 증가 되었으며, 이는 3개의 수직 연결부로 인양할 경우 ⑤번 수직 연결부가 전담하게 되는 하중이 많기 때문인 것으로 확인되었다. 철근에 발생하는 최대 응력 또한 최대 처짐은 ⑤번 수직 연결부 부근에서 발생하였으며, 나선철근이 없는 경우 6개 사용 시 6.14 MPa, 3개 사용 시 12.4 MPa, 나선철근이 있는 경우 6개 사용 시 6.03 MPa 3개 사용 시 12.2 MPa로 나타나 나선철근에 의해 소폭 감소하였다. 3개의 수직 연결부를 사용하여 인양할 경우 6개 수직 연결부를 사용하여 인양할 경우보다 철근에 2배 이상의 최대 응력이 발생하였다. 이는 인양 시 풍하중 등의 현장 조건에 따라 더욱 증가할 수도 있을 것으로 판단된다. 슬래브의 최대 1차 주응력은 나선철근의 유무와 상관없이 6개의 수직 연결부로 인양 시 3.04 MPa (인장)의 응력이 ②번 수직 연결부 부근에서 발생하였으며, 3개의 수직 연결부로 인양 시 ⑤번 수직 연결부 부근에서 4.97 MPa(인장)의 응력이 발생하게 되어 나선철근에 의한 영향이 거의 발생하지 않고 허용응력(4.45 MPa)을 넘는 것을 확인할 수 있다. 슬래브의 길이방향 최대 응력은 나선철근의 유무와 수직 연결부의 개수에 상관없이 모두 ⑤번 수직 연결부 부근에서 발생하였으며, 나선철근을 사용하여 6개의 수직 연결부를 이용한 인양의 경우 2.95 MPa(인장)로 나타났으나, 3개의 수직 연결부로 인양할 경우 5.35 MPa(인장)로 나타나 슬래브의 허용응력을 초과하였다. 나선철근을 사용하지 않을 시 6개 수직 연결부로 인양할 경우 2.94 MPa(인장)로 나선철근을 사용하는 경우보다 더 낮은 인장응력이 발생하였고, 3개의 수직 연결부로 인양할 경우 5.35 MPa(인장)로 나타나 3개의 수직 연결부를 사용할 경우 나선철근의 유무와 관계없이 슬래브의 허용응력을 넘는 것으로 확인되었다. 슬래브의 두께방향 응력은 6개 수직 연결부 사용 시 ②번 수직 연결부 부근에서 최대응력이 발생하고 3개 수직 연결부 사용 시 ⑤번 수직 연결부 부근에서 최대응력이 발생하였다. 나선철근이 매입되어 있고 수직 연결부 6개를 사용해서 인양하는 경우 슬래브 두께방향 최대 응력이 1.73 MPa(인장) 발생하였고 나선철근이 없는 경우는 12.3 MPa(인장)의 최대응력이 발생하여 나선철근이 매입되어 있는 경우 슬래브 두께방향에 발생하는 응력을 감소시켜 인양 시 유리하게 작용하는 것으로 확인되었다. 수직 연결부 3개를 사용하고 나선철근이 매입되어 있는 경우는 3.10 MPa(인장)의 응력이 발생하고 매입되어 있지 않은 경우는 22 MPa(인장)의 응력이 발생하여 나선철근의 유무에 따라 최대 710%의 응력이 증가하였다. 슬래브의 폭방향 최대 응력은 나선철근의 사용여부에 관계없이 수직 연결부 6개를 사용하여 인양할 경우 ②번 수직 연결부 부근에서 최대 응력이 발생하였고, 3개의 수직 연결부를 사용하여 인양할 경우 ⑤번 수직 연결부 부근에서 최대응력이 발생하였다. 수직 연결부 6개를 사용하여 인양 시

Case L8_WR, Case L8_WOR 모두 0.96 MPa(인장)의 인장 응력이 발생하였고, 수직 연결부 3개를 사용하여 인양 시 Case L8_WR은 1.51 MPa(인장), Case L8_WOR은 1.50 MPa(인장)의 최대 응력이 발생하여 나선철근 매입 시 인장응력이 소폭 증가하는 것이 확인되었으나 허용휨응력을 넘지는 않는 것으로 확인되었다. 나선철근에 발생하는 응력은 6개 수직 연결부 사용 시와 3개 수직 연결부 사용 시 모두 많은 하중을 전담하게 되는 ⑤번 수직 연결부의 나선철근에서 발생하였으며 6개 수직 연결부 사용 시 5.84 MPa, 3개 수직 연결부 사용 시 11.7 MPa로 나타났다. 6개 수직 연결부를 사용하여 인양 시 3개 수직 연결부 사용 대비 나선철근에 작용하는 응력을 50% 감소시켜 6개의 수직 연결부를 이용한 인양이 더욱 바람직한 인양방법으로 판단된다.

9 m 슬래브의 인양 시의 해석결과를 Table 6에 나타냈다. 6개의 수직 연결부를 사용하는 슬래브의 최대 처짐은 왼쪽 경간에서 나타났으며 나선철근의 매입 유무와 상관없이 0.35 mm 발생하였고, 3개 수직 연결부를 사용할 경우 ②번 수직 연결부 부근에서 2 mm 발생하였다. 수직 연결부 최대응력은 8 m와 같은 위치인 ⑤번 수직 연결부에서 발생하였으며, 수직 연결부 6개를 사용하는 Case L9_WOR의 앵커볼트에서

Table 6 Obtained results from 9 m slab due to liftinf loading

	Six Vertical Joints		Three Vertical Joints	
	Case L9_WOR	Case L9_WR	Case L9_WOR	Case L9_WR
Slab Displacement (mm)	-0.35	-0.35	-2.00	-2.00
Vertical Joint Stress (MPa)	210 / 121 < f_y	210 / 121 < f_y	383 / 219 > f_y	383 / 219 > f_y
Reinforcement Stress (MPa)	7.73	7.59	14.0	13.7
First Principal Stress of Slab (MPa)	Tension 3.43 < f_r	Tension 3.43 < f_r	Tension 5.98 > f_r	Tension 5.98 > f_r
Axial Stress of Slab (MPa)	Tension 3.11 < f_r	Tension 3.11 < f_r	Tension 5.53 > f_r	Tension 5.54 > f_r
Stress of Slab Depth (MPa)	Tension 2.23 < f_r	Tension 2.24 < f_r	Tension 3.8 < f_r	Tension 3.82 > f_r
Stress of Slab Width (MPa)	Tension 1.10 < f_r	Tension 1.10 < f_r	Tension 1.89 < f_r	Tension 1.90 < f_r
Reinforcement Stress (MPa)	N.A.	7.43	N.A.	13.5

$$f_r = 0.63\sqrt{f_{ck}} = 4.45 \text{ MPa,}$$

$$f_y = 400 \text{ MPa}$$

210 MPa 외서에서 121 MPa 발생하였고, 수직연결부 3개를 사용하는 경우 Case L9_WOR, Case L9_WR 모두 앵커 볼트에서 383 MPa 외서에서 219 MPa로 발생하여 항복강도를 초과하지 않았다. 앵커볼트의 인장응력은 항복응력 대비 6개 수직연결부 사용 시 52.5% 3개 수직연결부 사용 시 95.8%로 나타나 6개 수직연결부 사용이 더욱 유리한 것으로 확인되었다. 철근에 발생하는 응력은 6개의 수직연결부를 사용하여 인양하는 경우 Case L9_WR, Case L9_WOR 모두 ②번 수직연결부 부근의 철근에서 최대응력이 발생하였고, 3개 수직연결부를 사용하여 인양하는 경우 Case L9_WR, Case L9_WOR 모두 ⑤번 수직연결부 부근의 철근에서 최대응력이 발생하였다. 나선 철근의 매입유무에 대해서 비교하면 6개의 수직연결부 사용 시 Case L9_WOR은 7.73 MPa(인장), Case L9_WR은 7.59 MPa(인장), 3개 수직연결부를 사용하여 인양할 시 Case L9_WOR은 14 MPa(인장), Case L9_WR은 13.7 MPa(인장) 발생하였다. 슬래브에 발생하는 최대 1차 주응력은 나선철근의 매입 유무에 관계없이 6개 수직연결부를 이용하여 인양 시 3.43 MPa(인장)로 안전하였고, 3개 수직연결부를 사용하여 인양할 경우 5.98 MPa(인장) 발생하여 허용휨응력을 넘는 것을 확인 하였다. 슬래브에 발생하는 1차 주응력은 ⑤번 수직연결부 부근에서 발생하였으며 나선철근의 유무에 관계없이, 수직연결부 6개를 사용하여 인양 시 3.43 MPa(인장) 발생하였고 수직연결부 3개를 사용하여 인양 시 5.98 MPa(인장) 발생하여 수직연결부 3개 사용 시 70% 증가된 응력이 발생하여 허용응력을 넘는 것을 확인 하였다. 슬래브의 길이방향 최대 응력의 위치는 6개 수직연결부를 사용하여 인양할 경우 ②번 수직연결부에서 최대 응력 3.11 MPa(인장)이 나선철근의 매입유무와는 상관없이 동일하게 발생하였으며, 3개 수직연결부를 사용하여 인양할 경우 가운데 수직연결부인 ⑤번 수직연결부에서 나선철근이 없을 시 최대 응력 5.53 MPa(인장) 나선철근이 있을 시 5.54 MPa(인장) 발생하여 허용휨응력을 초과하였다. 슬래브의 두께방향 최대 응력은 인양 시 수직연결부의 개수와 나선철근의 유무와 관계없이 모두 ⑤번 수직연결부 부근에서 발생하였다. 수직연결부 6개 사용 시 나선철근이 매입되어 있는 경우 2.24 MPa(인장)의 최대응력을 발생시켰고 나선철근이 매입되어 있지 않은 경우 2.23 MPa(인장)의 최대응력을 발생시켰으며 수직연결부 3개 사용 시 나선철근이 매입되어 있는 경우 3.82 MPa(인장) 매입되어 있지 않은 경우 3.80 MPa(인장) 발생하여 나선철근이 매입되어 있을 시 더 높은 응력을 발생시켰으나 허용휨응력을 초과하지 않았다. 슬래브의 폭방향 최대응력은 수직연결부 6개를 사용하여 인양 시 ②번 수직연결부 부근에서 발생하였고 수직연결부 3개를 사용하여 인양 시 ⑤번 수직연결부 부근에서 발생하였다. 슬래브의 폭방향 최대 응력은 6개 수직연결부 사용 시 나선철근의 매입 유무와는 상관없이 동일하게 1.10 MPa(인장)이 발생하였고 수직연결부 3개를 사용하여 인양할 시 나선철근이 매입되어 있을 경우 1.90 MPa(인장) 나선철근이 매입되어 있지 않을 경우 1.89 MPa(인장) 발생하여 모두 허

용휨응력을 초과하지 않았다. 나선철근에 발생하는 응력은 수직연결부 6개 사용하여 인양할 경우 7.43 MPa, 수직연결부 3개 사용하여 인양할 경우 13.5 MPa이 발생하여 8 m 슬래브에 비하여 나선철근에 작용하는 응력이 최대 27% 증가하는 것으로 확인되었다.

4. 결 론

본 연구에서는 온도하중과 차량하중에 영향을 받는 모듈러 도로 슬래브에 나선철근을 매입하여 그 구조성능을 확인하였으며, 인양 시의 슬래브에 분포하는 응력에 대해서도 구조해석을 실시하여 확인하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 경간의 길이에 따라 슬래브에 발생하는 최대 응력의 위치가 달라진다.
- 2) 계절에 따른 온도경사하중에 의한 영향이 지배적인 것으로 나타났다. 동절기의 8 m 슬래브에서 슬래브가 허용응력을 넘어서는 것이 확인되었으므로 보강이 필요하며 하절기의 8 m 슬래브, 9 m 슬래브, 동절기의 8 m 슬래브에서 수직연결부의 항복이 발생하므로 보강이 필요하다.
- 3) 온도하중의 영향으로 9 m 슬래브에 나선철근 매입 시 슬래브의 1차 주응력이 소폭 증가하나 허용응력은 초과하지 않는 것으로 확인되었다.
- 4) 인양 시 3개의 수직연결부를 이용하여 인양할 경우 휨 인장강도를 초과하게 되어 슬래브에 손상이 발생하게 된다. 6개 수직연결부를 이용하여 인양할 시 최대 50%의 응력을 감소시킬 수 있는 것으로 확인되어 6개의 수직연결부를 이용하여 인양하는 것이 타당한 것으로 판단된다. 이 때, 인양 시 경간의 중심부의 수직연결부에 응력이 집중되므로 주의가 필요하다.
- 5) 8 m 슬래브 인양 시 수직연결부 부근에 나선철근을 매입할 경우 슬래브의 두께방향 응력을 최대 85% 감소시킬 수 있는 것으로 확인되어 나선철근의 매입이 인양 시에 슬래브 손상방지에 효과적인 것으로 확인되었다.
- 6) 본 연구에서 제시된 모듈러 도로 슬래브는 국내 도로 교설계기준에서 제시하는 차량하중과 온도하중, 온도경사하중 그리고 시공하중에 대해 도로교설계기준을 만족하였으나 해석 시, 수직연결부가 항복하여 보강이 필요한 것으로 확인되었다. 추가적으로 피로하중, 피복두께 등 내구성에 대한 연구가 수행되어야 할 것으로 판단되며 인양 시의 동적해석 역시 수행되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2014년 건설기술연구원과 한국연구재단(No.2015 R1C1A1A02036617)의 지원을 받아 수행된 연구임.

References

1. Lee, P., Park, C., and Jung, E. "R&D in Modular Bridges", *Magazine of the Korea Concrete Institute*, Vol.25, Issue.2, 2013, pp.16.
2. Lee, J., Lee, S., Song, J. and Park, K. "Static Load Tests on Flexural Strength and Crack Serviceability of a Longitudinal Joint for the Slab-Type Precast Modular Bridges", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.27, Issue.2, 2015, pp. 137-145
3. Joo, B., Song, J., and Lee, S. "Flexural & Fatigue Evaluation of Link Slab for Continuous Girder-Type Precast Modular Bridges", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.25, Issue.5, 2013, pp. 517-528
4. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, Korean Highway Bridge Design Code(Limit State Design), Korea Road and Transportation Association, 2012.
5. AASHTO LRFD, AASHTO LRFD BRIDGE DESIGN SPECIFICATIONS Customary U.S. Units, AASHTO, 2012.
6. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, User Manual for Road Pavement Structure Design Program, Republic of Korea, 2011.
7. Park, S., Kim, W., Song, J., and Lee, S., "Joint Performance Evaluation and development of Modular Road System", *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol.13, No.6, 2013, pp.131-137.
8. ANSYS Inc., ANSYS APDL theory guide, Release 14.5 ANSYS Inc. 2010.
9. Lee, J., and F. L. Fenves, "Plastic-Damage Model for Cyclic Loading of Concrete Structures", *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 124, no.8, 1998, pp.892-900.
10. International Federation for Structural Concrete, CEB-FIP MODEL CODE 2010, Lausanne Switzerland, 2010.
11. David, K. M., McCullough, B. F., Burns, N. H., and Schindler, Anton K., "Feasibility of precast prestressed concrete panels for expediting PCC pavement construction", *Report No. FHWA/TX-01/1517-1*, Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin, 2000.
12. David, K. M., McCullough, B. F., and Burns, N. H. "Construction and Preliminary Monitoring of the Georgetown", Texas Precast Prestressed Concrete Pavement. *Report No. 1517-01-IMP*, Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin, 2002.
13. David, K. M., McCullough, B. F., and Burns, N. H. "Construction of the California Precast Concrete Pavement Demonstration Project", *Report No. FHWA-IF-06-010*, The Transtec Group Inc., 2004.
14. Drago, J. "Innovation Fast-Setting Concrete", *Caltrans Journal*, Vol.2, No.4, 2002, pp.46-49.
15. Kohler, E., du Plessis, L., Smith, P. J., and Pyle, T. "Precast Concrete Pavements and Results of Accelerated Traffic Load Test", International Conference on Optimizing Paving Concrete Mixtures and Accelerated Concrete Pavement Construction and Rehabilitation, Atlanta, GA, USA, 2007, pp.263-282.
16. Houben, "APT Testing and 3D Finite Element Analysis of 'Modieslab' Modular Pavement Structures", Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geosciences Road and Railway Engineering, 2004.
17. ABAQUS, ABAQUS Documentation, Dassault Systemes, Providence, RI, U.S.A, 2013.
18. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, Concrete Structural Design Code, 2012.

요 약 교량의 슬래브에 파손이 발생할 경우 슬래브의 보수보강을 위한 공사로 인해 차량 통행이 제한된다. 모듈러 교량의 경우 이러한 시간적 비용을 줄일 수 있는 방법으로서 많은 연구가 진행되고 있다. 본 연구에서는 연결부에 높은 응력이 발생하는 모듈러 도로 슬래브를 온도하중과 차량하중을 적용하여 구조해석을 실시하였으며 수직연결부 부근에 나선철근을 매입하여 그 성능을 확인하였다. 또한 인양 시의 모듈러 도로 슬래브의 거동 및 취약부분을 확인하기 위하여 인양하중을 적용한 구조해석을 실시하여 유리한 조건의 인양방법을 살펴보았다. 그 결과 온도하중에 의해 수직연결부가 항복하는 것이 확인되었으며, 나선철근을 수직연결부 부분에 매립할 경우 인양 시에 구조물의 손상이 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 6개 수직연결부를 이용하여 인양할 시 3개 수직연결부 사용대비 50%의 응력을 감소시킬 수 있는 것으로 확인되었다.

핵심용어 : 모듈러 도로 슬래브, 구조해석, 수직연결부, 차량하중, 온도하중, 인양