

콘크리트 모듈러 도로 축하중 거동 분석을 통한 설계 타당성 검증

Design Validation through Analysis of Concrete Modular Road Behavior under Static Axial Loads

남정희	Nam, Jeong-Hee	정회원 · 한국건설기술연구원 SOC연구소 도로연구소 연구위원 · 교신저자 (E-mail : archnam@kict.re.kr)
김우석	Kim, Woo Seok	충남대학교 토목공학과 교수 (E-mail : wooseok@cnu.ac.kr)
김기현	Kim, Ki Hyun	정회원 · 한국건설기술연구원 SOC연구소 도로연구소 수석연구원 (E-mail : kihyun@kict.re.kr)
김연복	Kim, Yeon Bok	정회원 · 한국건설기술연구원 SOC연구소 도로연구소 전문연구위원 (E-mail : bykim@kict.re.kr)

ABSTRACT

PURPOSES : The purpose of this study is to validate the design criteria of the concrete modular road system, which is a new semi-bridge-type concept road, through a comparison of numerical analysis results and actual loading test results under static axial loads.

METHODS : To design the semi-bridge-type modular road, both the bridge design code and the concrete structural design code were adopted. The standard truck load (KL-510) was applied as the major traffic vehicle for the design loading condition. The dimension of the modular slab was designed in consideration of self-weight, axial load, environmental load, and combined loads, with ultimate limit state coefficients. The ANSYS APDL (2010) program was used for case studies of center and edge loading, and the analysis results were compared with the actual mock-up test results.

RESULTS : A full-scale mock-up test was successfully conducted. The maximum longitudinal steel strains were measured as about 35 and 83.5 micro-strain (within elastic range) at center and edge loading locations, respectively, under a 100 kN dual-wheel loading condition by accelerating pavement tester.

CONCLUSIONS : Based on the results of the comparison between the numerical analysis and the full-scale test, the maximum converted stress range at the edge location is 32~51% of the required standard flexural strength under the two times over-weight loading condition. In the case of edge loading, the maximum converted stresses from the Westergaard equation, the ANSYS APDL analysis, and the mock-up test are 1.95, 1.7, and 2.3 times of that of the center loading case, respectively. The primary reason for this difference is related to the assumption of the boundary conditions of the vertical connection between the slab module and the crossbeam module. Even though more research is required to fully define the boundary conditions, the proposed design criteria for the concrete modular road finally seems to be reasonable.

Keywords

concrete modular road, semi-bridge type, self compacting concrete, precast concrete slab, edge loading

Corresponding Author : Nam, Jeong-Hee, Research fellow
Highway and Transportation Research Institute
Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology 283,
Goyangdae-ro, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do, 10223, Korea
Tel : +82.31.910.0190
E-mail : archnam@kict.re.kr

International Journal of Highway Engineering
http://www.ksre.or.kr/
ISSN 1738-7159 (print)
ISSN 2287-3678 (Online)
Received Nov. 16, 2015 Revised Nov. 16, 2015 Accepted Nov. 26, 2015

1. 서론

도로에서 교량과 토공 접속부는 공용 중에 뒷채움부

침하로 인해 접속부 단차가 발생될 확률이 높으며 이에 따라 포장 균열, 주행쾌적성 저하, 심한 경우에는 안전

문제를 야기시킬 수 있는 구간이다. 또한 연약지반구간, 항만 및 공항 등 지반취약구간에 대해서 적용하는 전통적인 적층식 포장 구조(layered pavement system)로는 하부구조 불균형, 공용 중 침하/단차 발생문제를 해결하는데는 한계가 있다. 이같이 하부구조 취약구간에 대해 말뚝(pile) 등을 이용해 지반 지지력을 확보하고, 프리캐스트 공법을 적용하여 급속시공을 할 수 있는 새로운 형식의 도로 개념 연구가 네덜란드에서 2000년 초반(Houben et al., 2005)에 시작되었으며, 실제 지지 말뚝을 이용한 현장 적용이 2006년 네덜란드 A 12 Oudenrijn Bypass구간에 성공적으로 적용된 것은 시사하는 바가 크다고 할 수 있겠다.

이같은 새로운 도로의 기본적인 개념은 마찰말뚝 혹은 하부지지 말뚝을 이용하여 지반취약구간에 지지력을 우선적으로 확보한 후 상부에 말뚝 캡(cap) 혹은 크로스빔(cross beam)형태의 하중 전달부재를 설치한 후, 프리캐스트 형식의 콘크리트 슬래브 부재를 상부에 설치하는 형태이다. 이같은 방식은 전통적인 적층식 형태의 포장 개념을 도입하지 않고, 교량형식을 도로에 접목한 개념으로 최상층 슬래브가 지지부재 사이에 떠 있는 세미브리지 형식(semi-bridge type)으로 새롭게 정의내릴 수 있다.

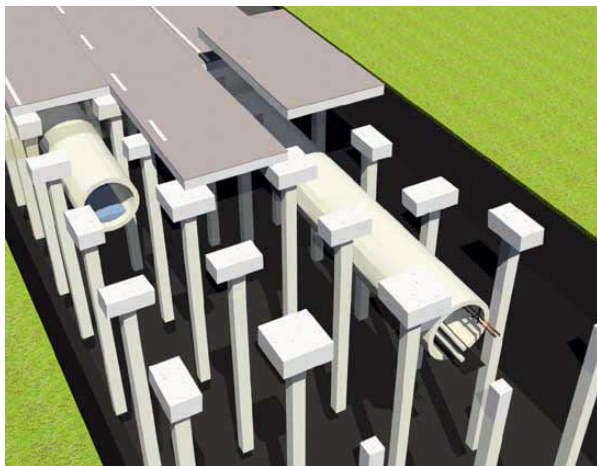


Fig. 1 Modie Slab Concept (Semi-Bridge Type) by ModieSlab Brochure (2008)

국내에서도 이같이 교량-토공 접속부, 연약지반 구간, 항만 및 공항 도로 등 지반취약 구간에 적용가능한 새로운 형식의 프리캐스트 모듈형 도로에 대한 연구를 2013년부터 수행하였다. 이를 위한 첫 단계로 크로스빔과 프리캐스트 형식의 콘크리트 슬래브를 이용한 프로토타입(proto type) 형태의 세미브리지 모듈러 도로를 설계 및 제작하여 시험시공을 수행하였으며, 축하중에 의한 모듈

러 도로의 정적거동 분석 연구를 진행하고 있다.

본 논문에서는 세미브리지 형식의 콘크리트 모듈러 도로의 축하중 거동분석을 통한 설계 타당성 검증을 목적으로 구조설계, 수치해석, mock-up 실험, 하중재하 실험을 순차적으로 수행하였다. 이를 통해 향후 단계적으로 개발 예정인 하부지지모듈을 포함한 완전한 모듈러 도로의 기본 설계 자료를 확보하는 것이 본 연구의 주요 목적이다.

2. 콘크리트 모듈러 도로 구조설계

2.1. 모듈러 도로 모듈(module) 크기 검토

콘크리트 모듈러 도로 실용화를 위해 선행 결정해야 할 사항은 이동성, 시공성 및 사용성 등을 고려한 기본 모듈 크기의 결정이다. 모듈의 단위가 너무 작을 경우, 이동 및 시공성은 용이하나 모듈간 연결부위가 많아짐으로 인해 주행쾌적성이 저하될 우려가 있으며, 반면 모듈 단위가 너무 클 경우, 사용성은 용이하나 이동성 및 시공성이 저하되는 문제가 발생한다.

따라서 최적 기본 모듈 크기결정을 위해 도로이용에 관한 최상위법인 도로법 시행령 55조(국토교통부, 2013), 도로의 구조·시설기준에 관한 규칙(국토교통부, 2013)과 2006년부터 교통량 조사에 적용되고 있는 국내 12종 차량에 대한 검토를 실시하였다. 도로법 시행령에 따르면 축하중이 10톤을 초과하거나 총중량이 40톤을 초과하는 차량이나 차량의 폭이 2.5m, 높이가 4.0m, 길이가 16.7m를 초과하는 차량은 운행을 제한할 수 있다고 명시되어 있다. 차량의 최소 폭에 대해서는 도로의 구조·시설에 관한 규칙(국토교통부, 2013)에서 고속도로의 경우 3.25~3.50m, 일반도로에서는 설계속도 및 지역에 따라 3.00~3.50m로 차로 폭을 규정하고 있어, 고속도로의 최소 폭의 최대규정인 3.5m를 기본으로 선택할 경우 활용 가능성이 가장 높다. 그러나 실제 도로에서 3.5m 폭 구조물의 이동을 위해서는 관할 경찰서의 허가를 사전 득하고, 호송차량의 투입 등이 필요하나, 이는 모듈러 도로의 실용화 단계에서 특수차량 도입, 혹은 현장 프리캐스팅 방식 등의 적용으로 문제점이 보완 가능하므로 모듈러 도로의 기본 폭을 3.5m로 결정하였다. 국내 차종 분류에 따르면 7종 차량은 화물 수송용 트럭 형식으로 5축 1단위 차량이며, 적재함 길이는 10m, 최대적재중량은 약 25ton이다. 12종 차량은 화물 수송용 세미 트레일러 형식으로 6축 이상 2단위(견인차, 피견인차)차량으로 적재함길이는 8~12m이며, 최대

적재중량은 약 24~26ton으로 파악되었다.

이와 같이 도로법 시행령, 시설기준에 관한 규칙 및 국내 가용 트럭에 대한 분석을 통해, 모듈 폭 3.5m, 높이가 0.3m를 기준으로 Table 1에서와 같이 최대 9m 길이의 슬래브를 제작할 수 있는 것으로 파악되었으나, 7종 및 12종 트럭을 동시에 고려할 경우 적용 가능한 최대 크기인 8m를 기본 모듈의 길이로 최종 결정하였다.

Table 1. Decision of Conceptual Modular Slab Dimension

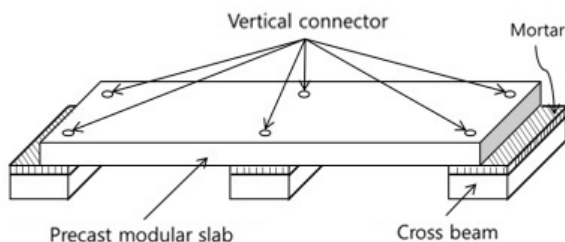
Class	Cargo length (m)	Max. carrying capacity (ton)	Slab length (m)	Slab weight (ton)	Applicability
7	10	25	9	23.60	○
			10	26.25	×
12	8	26	8	21.00	○
			9	23.60	○
	10	25	10	26.25	×
			9	23.60	○
	12	24	9	23.60	○
			10	26.25	×

2.2. 모듈러 도로 적용 하중 검토

모듈러 도로의 경우 적층 형식(layered type)의 도로 포장과 근본적으로 구조적 거동이 상이한 세미 브리지(semi-bridge, Fig. 2 참조)형식의 새로운 도로로, 구



(a) Perspective Drawing of Semi-bridge Type Modular Road



(b) Schematic Diagram of Slab Module + Cross Beam Module

Fig. 2 Conceptual Design of Semi-bridge Type Modular Road (Slab Size: L:8m×W:3.5m×D:0.3m)

조설계를 위해서 도로교 설계기준(국토해양부, 2012)과 콘크리트 구조기준 (2012)를 준용하여 구조설계를 실시하였다(김우석, 2015).

구조 설계를 위해서 슬래브 모듈의 크기는 길이(L) 8m, 폭(W) 3.5m, 두께(D) 0.3m로 결정하였으며, 상부 구조물인 슬래브 모듈은 하부 구조물인 크로스빔(cross beam) 모듈과 Fig. 2 (b)에서 보는 것과 같이 상하 방향은 구속되거나 횡방향의 변위가 가능한 6개의 수직 조인트로 체결되어 있으며 크로스 빔 모듈은 4m 간격으로 슬래브 모듈 하부에 설치하여 지반에 고정시켰다. 실제 모듈러 도로의 경우 수직조인트 위치가 양 끝단에서 0.15m씩 안쪽으로 들어와 있으나 면으로 접하기 때문에 보수적 설계를 실시하는 관점에서 모델링 시 양 끝단에 있는 것으로 해석하였다. 변위와 반력을 확인하기 위하여 Midas Civil 2012+을 사용하여 단면설계 및 구조 해석을 실시하였으며, 해석 시 하중은 자중과 축하중, 환경하중을 고려하여 각각의 하중에 대한 거동을 확인하여 최대 변위와 반력을 일으키는 하중 값을 확인하였다. 그 후에 하중 조합에 의한 최대 변위와 반력을 사용하여 단면 설계를 실시하였다.

2.2.1. 축하중 정량화

두 지간에 하중이 재하되었을 경우보다 한 지간에 하중이 재하되었을 경우에 최대 변위와 모멘트가 작용하기 때문에 슬래브 모듈의 해석에서 축하중은 도로교설계기준(국토해양부, 2012)에 제시되어 있는 표준트럭하중(KL-510)에서 가장 큰 하중(192kN)만을 적용하여 재하하였다. 또한, 슬래브 모듈의 길이가 8m로서 AASHTO LRFD(2012)에서 제시한 연행 차량 간 거리(약 16m)보다 길이가 짧기 때문에 연행하중은 적용하지 않았다.

2.2.2. 환경하중 정량화

환경하중은 온도하중과 온도경사하중을 고려하였다. 슬래브 모듈 상부의 온도가 높고 하부의 온도가 낮은 여름과 상부의 온도가 낮고 하부의 온도가 높은 겨울, 두 가지의 경우를 고려하였다. 상하부의 온도차가 큰 경우에 변위와 모멘트가 크게 발생하기 때문에 여름과 겨울철 최대 단면온도차가 발생하는 시점에 대해 검토를 하였으며 각 계절의 온도는 도로포장구조 설계해설서(2011, 국토해양부)에 제시되어 있는 실측 데이터 중 최고/최저값(하절기에는 상부 46.5℃ 하부 2.9℃, 동절기에는 상부 -4.5℃ 하부 4℃를 적용)을 선택하여 적용하

였다. 또한, 시공 시 온도는 15℃로 가정하였으며 열해 석 수행 시 온도 구배는 직선으로 가정하였다.

2.2.3. 최대하중 조합

축하중과 환경하중의 해석 결과를 바탕으로 원편 지간이 상향컬링(upward curling)할 경우와 하향컬링(downward curling)할 경우로 나누어 상향컬링 시 최대 부모멘트, 하향컬링 시 최대 정모멘트를 발생시킬 때의 하중조합에 대해 설계를 실시하였다. 그 결과, 동절기 온도에서는 축하중을 원편 시간에 재하하여 원편 시간이 처지는 형태가 되도록 하고, 하절기에는 오른편 시간에 재하하여 원편 시간이 상승하도록 하였다.

위의 해석결과를 정리하여 Table 2에 나타내었으며, 해석결과를 도로교 설계기준(국토해양부, 2012)에 따라 각각의 하중별도 하중크기와 하중계수의 곱의 합으로 극한 한계상태와 사용 한계 상태값으로 나누어 Table 3에 나타내었으며, 이중 하중 값이 더 큰 극한 한계상태의 하중을 모듈러 도로 하중 값으로 선택하였다.

Table 2. Max. & Min. Shear Force and Moment under Different Loading Conditions

Type	Self weight		Axial load		Environmental load			
	Max	Min	Max	Min	Summer		Winter	
					Max	Min	Max	Min
Shear force (kN)	64	-64	306	-304	55	-55	27	-27
Moment (kN.m)	29	-51	201	-138	220	0	0	-106

Table 3. Combined Load Conditions Applied under Ultimate and Serviceability Limit State Coefficient

Type		Combined load (kN·m/3.5m)	Combined load / lane (kN·m/m)
Ultimate limit state design I	Max. positive moment (Mu)	398	114
	Max. negative moment (Mu)	312	89
	Max. shear force (Vu)	631	180
Serviceability limit state design I	Max. positive moment (Mu)	278	79
	Max. negative moment (Mu)	242	69
	Max. shear force (Vu)	383	109

2.3. 모듈러 도로 단면 설계

하중조합 해석 결과를 만족하는 단면설계를 위하여 도로교설계기준(국토해양부, 2012)과 콘크리트구조기준(국토해양부, 2012)을 바탕으로 단면설계를 실시하였다. 피복 두께 산정은 도로교설계기준 5.8장을 참조하여 철근의 내구성을 고려한 최소피복 두께와 설계 편차 허용량을 고려해 최종 45mm로 결정하였다. 배력 철근 및 온도철근의 산정과 균열검토는 각각 도로교설계기준 5.10장과 5.6장을 참조하였다. 처짐에 대해서는 도로교설계기준 5.6.4절을 적용하였으며, 철근량 검토는 콘크리트구조기준 6.3장에 의거하여 설계하였고, 최종적으로 산출된 최적 설계안을 Table 4에 나타내었다.

Table 4. Steel Reinforcement Design (per unit meter)

Main reinforcement of positive moment	Reinforcement	D19
	Spacing (mm)	200
	Amount of reinforcement (mm ²)	1432.5
Main reinforcement of negative moment	Reinforcement	D19
	Spacing (mm)	200
	Amount of reinforcement (mm ²)	1432.5
Distribution bar	Reinforcement	D13
	Spacing (mm)	200
	Amount of reinforcement (mm ²)	633.5

2.4. 정적 축하중 거동 해석

정적 축하중을 실제 모듈러 도로에 재하했을 경우 발생될 수 있는 최대 응력 위치 및 게이지 설치 위치를 검토하기 위해 슬래브 모듈에 대한 거동해석을 수행하였다. 해석은 ANSYS APDL(2010)을 이용하여 3차원 10절점 사면체요소(SOLID185)를 사용하여 슬래브와 모르타르, 그리고 크로스빔을 모델링 하였고 압축강도를 약 50MPa로 설정하였다. 철근은 3차원 트러스(BEAM188) 요소를 사용하였으며 항복강도는 400MPa를 사용하였다. 콘크리트의 재료모델에는 Concrete Damage Plasticity Model (Lee

Table 5. Input Variables of Modular Slab Analysis

Type	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

and Fenves 1998)을 사용하였으며, 강재의 재료모델에는 Elasto-Plastic 모델을 사용하였다. 해석모델에 사용된 각 모듈별 재료특성 값은 Table 5와 같다.

하중재하는 Fig. 3에서와 같이 크로스빔 지점과 지점 사이에서 가장 큰 변형이 예상되는 모서리(edge) 부위와 중심(center)부위에 트럭 복륜(dual wheel)을 각각 재하하는 경우를 가정하였다. 하중의 크기는 축하중(axial load)에 대해 도로법 시행령 적용 시 최대 기준인 10톤을 가정하여 50kN, 과적 상태를 고려하여 최대 100kN을 각각 재하하는 경우를 고려하여 해석을 수행하였다. Fig. 4는 모서리 부위에 복륜이 작용하였을 때 발생하는 종방향(x-축 방향)의 해석 결과로, 지점과 지점 사이에서 최대 정모멘트가 발생되며 크로스빔 상부의 수직조인트 연결부위에서 최대 부모멘트가 발생하는 것을 알 수 있다.

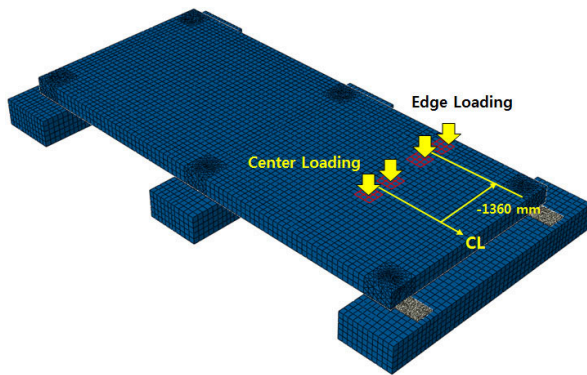


Fig. 3 Dual Wheel Loading Locations (Center&Edge)

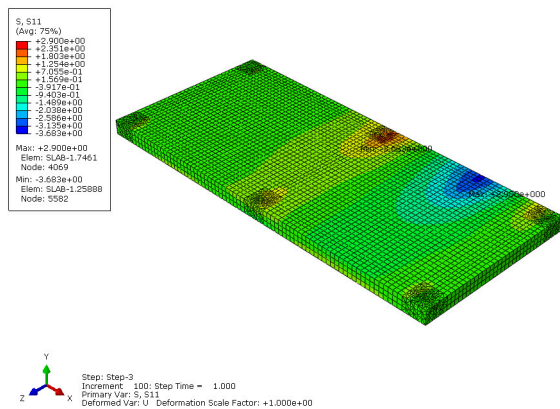


Fig. 4 X-Directional Stress under Edge Loading Condition

지점 중앙에 하중이 재하되었을 경우(center loading) 하중 크기별로 슬래브 모듈 하부에 발생하는 종방향 변형 거동 해석 결과를 Fig. 5와 같이 정리하였다. 하중재하 위치(화살표)를 중심으로 슬래브 모듈의 폭(width,

3500mm) 방향으로 좌우대칭 변형 구조를 명확히 보이며, 최대 100kN 재하 시 약 30micro-strain 정도의 변형률 거동을 보여주고 있다. 이는 탄성계수 가정치를 적용했을 경우 약 0.83MPa에 해당되는 값으로 도로포장 설계기준 휨강도 4.5MPa 기준 시 18%에 해당되는 응력 범위를 나타내고 있다.

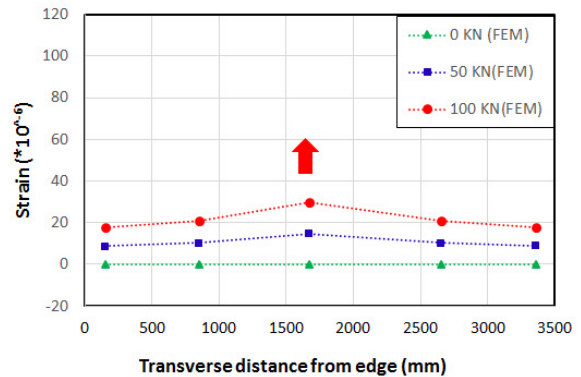


Fig. 5 Concrete Strain Variations through Modular Slab Width under Center Loading (50kN & 100kN)

슬래브 모서리에 하중이 재하되는 경우(edge loading)에는 Fig. 6에서와 같이 하중재하 위치를 중심으로 편심을 크게 받는 것으로 나타났으며, 변형률의 크기도 중심부 재하 크기의 약 1.7배에 해당되는 52micro-strain(응력 기준으로 약 1.43MPa, 도로포장 설계기준 휨강도 기준 시 약 32% 해당)을 보이고 있다. 이는 실제 구조물의 형상과 구속조건은 다르지만 콘크리트 포장에서 주로 많이 인용되고 있는 Westergaard(1926)가 제시한 interior loading과 edge loading에 대한 closed-form 형태의 이론식의 응력비인 1.95배와 유사한 경향을 보이고 있다.

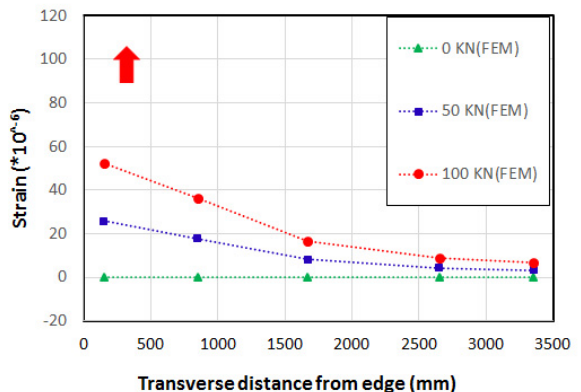


Fig. 6 Concrete Strain Variations through Modular Slab Width under Edge Loading (50kN & 100kN)

상기와 같이 정적하중 재하에 대한 해석검토 결과 기준치 2배의 하중조건과 모서리하중에 대한 최대 인장

변형이 도로포장설계 강도 기준치에 약 32%에 해당됨에 따라, 세미-브리지 형태의 모듈러 도로 단면설계는 타당한 안전율을 확보하였다고 가정할 수 있겠다. 다만 추후 실험을 통해 환경하중 및 피로하중의 영향에 대한 종합적인 검증절차가 남아 있음을 밝힌다.

3. 콘크리트 모듈러 도로 Mock-up 시공

3.1. SCC(Self-Compacting Concrete) 적용

공장생산을 전제로 하고 있는 콘크리트 모듈러 도로의 시공 편의성 및 성능향상을 위해 슬래브 재료로 SCC(Self-Compacting Concrete, 이하 SCC)를 적용하기로 결정하였다. SCC는 다짐과정 없이 재료의 균질성을 스스로 확보할 수 있는 고유동 콘크리트로 1988년 일본에서 Okamura(1998)에 의해서 최초로 개발되었다. SCC 목적을 달성하기 위해서는 고유동성(superior flowability), 충전능력(filling ability), 재료분리 저항성(resistance to segregation) 등이 확보되어야 하며 이를 통해 시공 효율성 및 시공 균질성이 극대화되는 고성능 재료로 분류된다. 그러나 SCC는 높은 흐름성(flowability)과 안정성(stability)을 동시에 요구하기 때문에, 설계자와 생산자가 이를 만족하는 배합에 도달하기 위해서는 많은 기술적 노력이 요구된다. 특히 SCC의 경우 일반적으로 도로포장에 사용되는 콘크리트 배합에 비해 결합재량이 많으며(바인더 함량 500kg/m³ 정도), 최대골재 치수가 작고(19mm), 고성능 혼화제(폴리카본산계)의 사용량도 많아 품질관리에 많은 주의가 필요하다.

본 mock-up 실험에 사용된 SCC의 기본 배합표는 Table 6과 같으며 고내구성을 확보하기 위해 물/결합재비(W/B)를 0.35, 유동성을 확보하기 위해 폴리카본산계 고성능 혼화제를 결합재 중량대비 1.5%를 사용하였으며, 장기내구성 확보 측면에서 플라이애시(fly ash)와 실리카흄(silica fume)을 사용하는 삼성분계 콘크리트 배합비를 적용하였다. 실제 mock-up 실험에서는 상용 레미콘을 이용하여 타설을 수행하였으며, Fig.

Table 6. Mixing Proportion of SCC

W/B	S/a (%)	Unit weight (kg/m ³)						HRWR+ AE
		W	C	F-A	SF	FA	CA	
0.35	55	182	400	78	11	846	711	1.5

W/C : Water Binder ratio, S/a : Fine agg. / (Fine agg.+coarse agg.)

W : Water, C : Cement, F-A : Fly-Ash, SF : Silica Fume

FA : Fine agg., CA : Coarse agg.

HRWR : High Range Water Reducer, AE : Air Entrainment



Fig. 7 Construction of Concrete Modular Slab using Self-Compacting Concrete

7에서와 같이 고유동성이 확보되어 다짐작업없이 모듈러 슬래브를 타설하였다.

SCC 재료에 대해 28일 강도 및 물성실험을 실시하여 압축강도 60.1MPa, 휨강도 5.9MPa, 탄성계수 27.6GPa를 얻었으며(Table 7 참조) 이는 설계해석에서 가정한 압축강도 및 탄성계수에 비해 각각 20% 향상, 25% 감소된 수치이다.

Table 7. Material Properties of Concrete at 28 Days

Properties		Measured value
Strength	Compressive strength (MPa)	60.1
	Flexural strength (MPa)	5.9
Elastic modulus (GPa)		27.6

3.2. 철근 변형 계측

콘크리트 모듈러 도로의 축하중 거동 분석을 위해 전기저항식(electrical resistance) 철근 변형률 게이지를 종방향 철근에 부착하였다. 게이지는 하중 가력 위치에 따른 변형률 크기 변화를 해석치와 비교하기 위해 Fig. 8과 같이 축하중이 슬래브 중앙에 재하되었을 경우(S3)와 슬래브 모서리에 재하된 경우(S1, S5)를 중심으로 계

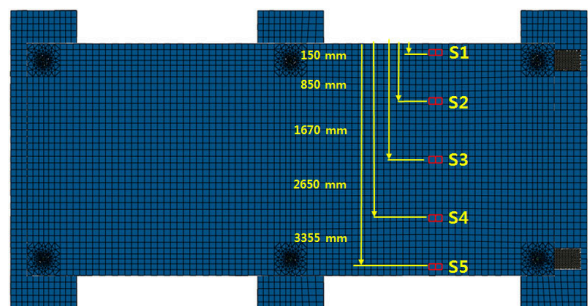


Fig. 8 Installation Layout of Steel Strain Gauges

이지를 배치하였으며, 슬라브 중앙과 모서리 사이에 S2와 S4를 추가 배치하였다. 데이터 측정은 정적 데이터 로고인 TDS-530을 사용하였으며 실제 축하중 재하 시는 하중 위치 및 하중 크기별 1분 단위로 데이터를 연속 측정하였다.

4. 축하중 실험을 통한 설계 타당성 분석

4.1. 축하중 재하 실험

축하중 재하 실험을 통해 실제 콘크리트 모듈러 도로 구조 설계 방향 및 해석결과의 타당성을 분석하기 위해, 중앙부 재하 및 모서리 재하실험을 하중 단계별로 수행하고 그 변형값을 설계 해석치와 비교·분석하였다. 실제 하중재하를 위해서 100kN까지 재하가능한 포장가속시험기(accelerating pavement tester)를 이용하여 실험을 진행하였으며, Fig. 9에서와 같이 중앙부 및 모서리 재하 시 50kN, 100kN으로 하중단계를 2단계로 구분하여 재하를 하였으며, 각 재하 하중이 안정화되었을 경우에 정적 데이터 로고를 이용하여 최대 변형률을 측정하였다.



(a) Center Loading (b) Edge Loading

Fig. 9 Actual Dual Wheel Loading using Accelerating Pavement Tester (APT)

설계 시 가정한 조건에 의한 해석 결과로 나타난 콘크리트 변형률이 30~50micro-strain 범위이므로, 이는 콘크리트 재료 탄성거동 범위의 안정측에 해당되고, 재하 하중범위 내에서는 콘크리트와 철근이 일체거동을 한다고 가정할 수 있으므로 콘크리트 변형 해석결과와 실험결과로 얻은 철근의 변형값을 비교·분석하였다.

4.2. 재하위치별 거동 분석

축하중을 중앙부에 각각 50kN과 100kN 재하하였을 경우, 실제 실험결과와 설계 시 가정한 FEM 해석결과를 Fig. 10과 같이 비교하였다. 하중재하 위치(화살표)를 중심으로 슬라브 모듈의 폭(width, 3500mm) 방향으로 좌우대칭 변형 구조를 실제 해석결과와 유사하게 실험결과도 명확히 보이고 있으며, 50kN 재하 시는 실

험 및 해석결과에 의한 슬라브 거동이 거의 일치하였으며, 100kN 재하 시는 슬라브 거동 형태는 실험과 해석결과와 유사하나 실제 해석결과보다 실험결과 값이 전체적으로 약 16% 정도 상향된 경향을 보이고 있다.

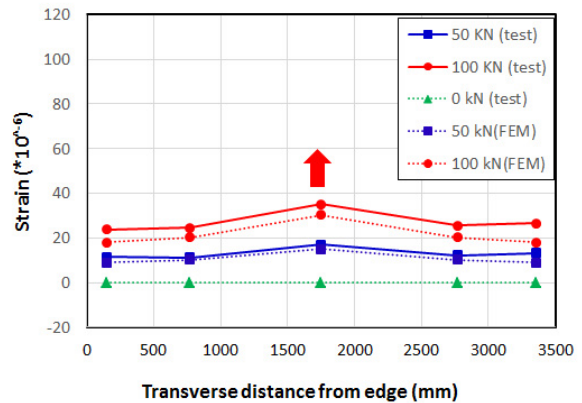


Fig. 10 Strain Comparisons between Testing Results and FEM Analysis Results under Center Loading

축하중을 모서리 부위에 각각 50kN과 100kN 재하하였을 경우, Fig. 11에서와 같이 실험결과 경향이 해석결과와 유사하게 하중재하 위치를 중심으로 편심을 크게 받는 것으로 나타났으며, 최대 변형률의 크기도 중심부 재하 크기의 약 2.3배(중심부 : 35, 모서리부 : 83.5micro-strain)로 나타났다. 전체적인 슬라브 거동 형상은 해석결과와 실험결과가 유사하였으나, 하중단계별 실험치와 해석치의 변형률 값은 크게 차이를 보이고 있다. 100kN 재하 시 실제 실험치가 해석치보다 최대 58% 증가된 변형률(응력기준으로 약 2.3MPa, 도로포장 설계기준 휨강도 기준 시 약 51% 해당) 거동을 보이고 있다.

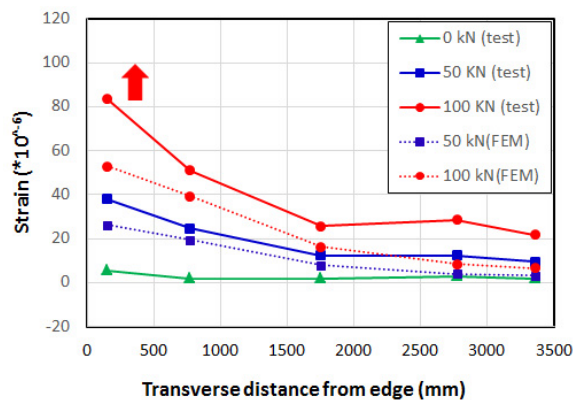


Fig. 11 Strain Comparisons between Testing Results and FEM Analysis Results under Edge Loading

이같은 실험결과와 해석값의 차이는 해석 시 가정한 탄성계수 및 강도값과 실제 모듈러 슬라브 재료 물성

치와 차이에서도 그 원인을 찾을 수 있겠다. 또한 중앙부 거동값의 차이보다 모서리 부위 거동값의 비교차가 훨씬 큰 점을 본다면, 수직 조인트로 연결된 부분에 대한 경계조건(boundary condition)의 설정과도 상관관계가 크다고 볼 수 있다. 해석 시 기본적으로 모듈러 슬래브와 크로스 빔의 경우는 수직조인트로 연결되어 수직거동(vertical movement)은 허용하지 않고, 수평거동은 수직조인트의 강성에 따라 허용하는 경계조건을 설정하였다. 그러나 실제 시공된 모듈러 슬래브의 수직 조인트 부위의 상세 거동이 해석 시 가정한 조건과 차이가 발생되었을 수도 있으므로 이를 반영한 경계조건 설정에 대한 자세한 검토는 지속적으로 보완되어야 할 사항으로 여겨진다.

5. 결론

교량-토공 접속부, 연약지반 구간, 항만 및 공항 도로 등 지반취약 구간에 적용 가능한 새로운 형식의 프리캐스트 모듈형 도로의 연구 필요성이 날로 증가되고 있다. 이를 위해 적층 형식의 도로포장과 근본적으로 구조적 거동이 상이한 세미 브리지(semi-bridge)형식의 새로운 도로 형식 개념을 개발하였으며, 도로교 설계기준 및 콘크리트 구조기준을 적용하여 구조설계를 실시하였다. 하중조건으로는 표준트럭하중(KL-510)을 적용하여 자중, 축하중, 환경하중을 조합한 후 극한한계상태 계수를 반영하여 단면설계를 실시하였으며, ANSYS APDL을 이용하여 중앙 및 모서리 부위에 축하중이 재하되는 경우에 대한 해석을 수행하여 단면설계의 안정성을 검토하였다. 모듈러 도로의 시공편의성 및 성능향상을 위해서 SCC를 이용하여 mock-up 시공을 성공적으로 실시하였으며, 실제 포장가속시험기를 이용하여 위치별 하중재하 실험을 통해 모듈러 도로의 설계 타당성을 검증한 후 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 새로이 제안된 세미 브리지(semi-bridge) 형식의 모듈러 도로 설계를 위해 도로교 설계기준을 준용하여 기본 설계를 실시하였으며, 정적하중 재하에 대한 해석 및 실험결과를 근거로 볼 때 도로법 축하중 기준치 2배의 하중조건과 모서리(edge) 하중에 대한 최대 인장변형이 도로포장설계 기준강도의 32~51% 범위에 해당되어 제시된 설계 방식은 타당한 것으로 보인다.
2. 모듈러 도로의 실용화를 위해 다짐과정 없이 재료의 균질성을 스스로 확보할 수 있는 고유동 콘크리트인

SCC(Self-Compacting Concrete)를 적용하여 Mock-up 시공을 실시하였으며, 재료의 흐름성, 충전능력, 재료분리 저항성 측면에서 공장 생산형 고내구성 모듈러 생산 재료로 적합한 형태인 것으로 판단된다.

3. 포장가속시험기를 이용해 실제 mock-up 실험체를 대상으로 중심부 및 모서리 재하실험을 50 및 100kN 크기로 정적 가력하였으며, 모서리 재하 시 최대 변형률이 중심부 재하 시 최대 변형률에 비하여 Westergaard 이론식, ANSYS APDL 해석 시, 실제 실험 시 1.95, 1.7, 2.3배 각각 증가되는 경향을 나타내었으며 이는 경계조건 차이로 발생된 것으로 생각된다.
4. 모듈러 도로 설계 타당성을 검증하기 위해 재하 위치 별(중심부 및 모서리 재하) 최대 변형률을 해석 및 실험결과를 통해 분석하였다. 중앙부 및 모서리 재하 시 전체적인 거동 경향은 해석 및 실험결과가 유사하였으나, 실제 변형률 거동은 실험치가 최대 58% 증가된 변형률을 보였으며 이는 재료 가정조건의 차이와 수직조인트의 경계조건 가정과 관련된 사항으로 보이며 지속적인 추가 연구가 필요한 분야로 여겨진다.

향후 환경하중에 의한 거동, 축하중과 환경하중의 조합에 의한 거동, 포장가속시험기를 이용한 피로하중에 대한 거동, 일반 무근 콘크리트 줄눈포장과의 거동 비교 분석을 통해 최적 콘크리트 모듈러 도로 설계방안에 대한 연구를 수행할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원의 주요사업(15주요-대1-모듈러1) 재원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- AASHTO LRFD (2012), AASHTO LRFD Bridge Design Specifications Customary U.S. Units, AASHTO, 2012.
- ANSYS Inc. (2010) ANSYS APDL Theory Guide, Release 14.5.
- Houben, L.J.M, Huurman, M, Kooij, J., and Poot S. (2005), Modieslab Innovative Concrete Pavement Structure: From Idea through Research to Implementation, 8th International Conference on Concrete Pavement, Aug. 14-18, Colorado Springs, USA.
- Kim, W.S, Nam, J.H, Min, G.H, Kim, K.J. and Lee, J.H.(2015) Detailed Analysis of Vertical Connector in Modular Roadway Slab under Temperature and Lifting Loading, draft of Journal of

- Korea Concrete Institute.
- MIDAS (2012) Midas Civil 2012+ Analysis Reference, MIDAS Information Technology Co.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs(2011), User Manual for Road Pavement Structure Design Program, Republic of Korea.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs(2012), Korean Highway Bridge Design Code(Limit State Design), Korea Road and Transportation Association.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs(2012), Concrete Structural Design Code.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport(2013), Decree of Road Law, Act 55th.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport(2013), Regulation of Structure and facilities of Road.
- ModieSlab (2008), ModieSlab-A Revolutionary new road surface, Modieslab brochure, UK.
- Okamura and Ouchi. (1998) Self-compacting high performance concrete, Structural Engineering and Materials, Vol I(4), pp. 378-383.
- Park, S., Kim, W., Song, J. and Lee, S.Y. (2013) Joint Performance Evaluation and development of Modular Road System, Journal of Korean Society of Hazard Mitigation, 13(6), pp. 131-137.
- Westergaard, H.M., (1926), Stresses in Concrete Pavements Computed by Theoretical Analysis, Public Roads, Vol. 7, pp. 25-35.