



프리캐스트 콘크리트 포장 시공 시 최적 슬래브 리프팅 위치

Optimum Slab-Lifting Positions for Precast Concrete Pavement Construction

김성민* 조병휘** 한승환***

Kim, Seong-Min Cho, Byoung Hooi Han, Seung Hwan

Abstract

This research was conducted to determine the optimum lifting positions on precast concrete slabs for precast concrete pavement construction, based on the analysis of concrete stress distribution under various lifting conditions. To analyze stresses in concrete slabs, the finite element method was implemented and a numerical model of the precast slab that was going to be used in the experimental construction was developed. Changes in the stress distribution due to the lifting angle were investigated because slab lifting is not always performed in the perpendicular direction to the slab surface. In addition, the effect of the lifting level, the distance between the neutral axis of the slab and the lifting point, on the stress distribution was investigated since the lifting point is not always at the neutral axis of the slab. To consider the actual steel design of the precast slab, the effect of the reinforcement near the lifting point was also investigated. From this study, the optimum lifting positions of the precast slabs were determined according to the lifting angle and level, and the results were compared with the lifting positions used in the PCI standards.

Keywords : precast pavement, concrete slab, lifting, lifting angle, lifting level, stress concentration

요 지

본 연구는 프리캐스트 콘크리트 포장 시공을 위하여 공장에서 미리 제작된 콘크리트 슬래브를 리프팅을 할 때 리프팅 위치에 따른 슬래브의 응력변화를 기준으로 슬래브의 손상을 최소화할 수 있는 가장 안전한 최적 리프팅 지점을 선정하기 위하여 수행되었다. 리프팅 시 슬래브의 응력분포를 분석하기 위하여 유한요소법을 이용한 모델을 사용하였으며 슬래브 규격은 시험시공에서 사용한 크기를 적용하였다. 리프팅은 항상 슬래브의 수직방향으로 수행하지는 않기 때문에 수직으로 리프팅하였을 때와 60°, 30°로 경사각을 주어 리프팅하였을 때의 응력변화 특성을 분석하였다. 또한 리프팅 지점은 항상 슬래브의 중간 깊이인 중립축의 위치가 아니기 때문에 중립축으로부터 7.5cm, 15cm만큼 수직편심을 주어 리프팅하였을 때의 응력변화 특성도 분석하였다. 그리고 실제 시공 시 지점부분에 보강을 하는 것을 염두하여 지점부 응력집중현상을 무시한 경우와 보강이 없을 경우의 응력집중현상을 고려한 경우로 나누어 분석하였다. 이러한 해석을 통해 리프팅 경사각과 편심에 따른 최적 리프팅 위치를 선정하였으며 미국의 PCI 기준과도 비교 분석하였다.

핵심용어 : 프리캐스트 포장, 콘크리트 슬래브, 리프팅, 경사각, 편심, 응력집중

* 정회원 · 경희대학교 토목건축대학 토목공학전공 교수
 ** 경희대학교 토목건축대학 토목공학과 석사과정
 *** 정회원 · 한국도로공사 도로교통기술원 수석연구원

1. 서 론

콘크리트 슬래브를 공장에서 미리 제작하여 신설 도로 건설 또는 기존 도로의 보수에 사용하는 방식인 프리캐스트 포장은 고성능 슬래브의 생산에 따른 우수한 내구성을 장점으로 가지고 있으며 신속한 보수가 가능하기 때문에 미국의 여러 지역에서는 오래전부터 사용되어 왔다. 1971년 미국 미시간 주에서는 줄눈철근콘크리트포장(JRCP: Jointed Reinforced Concrete Pavement)의 줄눈부를 보수하기 위하여 프리캐스트 슬래브를 사용하였으며 보수를 위한 차량의 통행제한 시간은 다웰을 사용하지 않은 부분은 불과 1시간 25분, 다웰을 사용한 부분도 2시간 40분에 지나지 않았다. 따라서 사용자의 불편을 최소화하며 효과적인 보수를 할 수 있었다. 1972년 미국 플로리다주에서는 철근이 없는 줄눈콘크리트포장(JCP: Jointed Concrete Pavement)의 파손된 부분을 보수하기 위하여 프리캐스트 슬래브를 이용하였다. 보수공사는 야간에 이루어졌으며 4개의 슬래브를 교체하는데 약 8시간이 소요되었다. 1981년 미국 텍사스 주에서는 연속철근콘크리트포장(CRCP: Continuously Reinforced Concrete Pavement)의 보수를 위하여 프리캐스트 슬래브를 사용하였다(Meyer and McCullough, 1983). 그 외에도 1974년 미국 캘리포니아주에서는 벤추라 고속도로의 콘크리트포장을 프리캐스트 슬래브를 이용하여 보수하였고, 뉴욕주에서는 태판지교의 톨게이트 부분의 전체 포장을 그림 1에 보인 바와 같이 프리캐스트 포장을 이용하여 보수하였다.

따라서 프리캐스트 포장은 보수를 위하여 어떤 콘크리트 포장의 형식에도 부합되는 보수방법으로 사용되어 왔다. 도로포장뿐만 아니라 공항포장에서도 프리캐스트 슬래브를 사용한 보수가 미국의 워싱턴 덜러스 국제공항에서 시행된 바 있다. 기본개념은 도로포장의 보수와 동일하며 비행기 이착륙이 적은 야간에 시공되었다.

프리캐스트 포장은 보수뿐만 아니라 신설 도로의

건설에도 사용되었다. 미국 사우스다코타주에서는 1960년대에 이미 프리캐스트 슬래브를 이용하여 신설도로를 건설한 경험이 있으며(Hargett, 1970), 프리캐스트 조립식 매트 슬래브는 미국 육군에 의해 미사일 운반대로 처음 개발되었다(Bull, 1991). 제작과정 중 슬래브의 횡방향으로 프리텐션을 가하며 슬래브 연결 시 종방향으로 긴장을 가하여 슬래브를 연결하였다. 미국 텍사스주에서는 2002년 프리캐스트 프리스트레스트 콘크리트 슬래브를 이용하여 연장 1km가 넘는 길이의 도로를 신설하기도 하였다(Merritt et al., 2000, 2001, 2002). 뉴욕주는 Fort Miller 회사가 개발한 Super Slab이라는 프리캐스트 포장방식을 이용하여 현재도 계속적으로 신설 도로를 건설하고 있다.

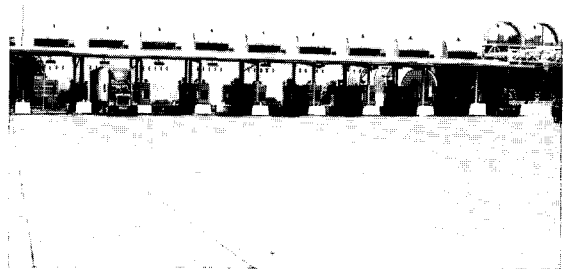


그림 1. 뉴욕주 태판지 교량 톨게이트 부분의 프리캐스트 포장

이와 같이 프리캐스트 포장은 유지보수용과 신설용으로 미국에서는 이미 널리 사용되어 왔다. 우리나라도 교통량의 증가에 따른 신속한 도로보수의 필요성이 크게 부각되고 있으며 도로품질의 향상 또한 매우 중요한 사항으로 공감하고 있다. 이에 가장 적합한 포장방식인 프리캐스트 포장을 우리나라에 적용하기 위하여 한국도로공사는 연구를 수행중에 있다.

프리캐스트 포장을 건설하기 위해서는 슬래브를 공장에서 제작한 후 일단 슬래브를 들어서 적당한 위치에 내려놓아 시공 시까지 보관을 하며 시공시에는 다시 들어서 운반용 트럭에 적재를 하여 시공현장까지 운반을 하며 또 다시 슬래브를 트럭에서 들어서 시공위치에 안착을 시키게 된다. 이와 같이 프리캐스



트 슬래브는 여러 차례에 걸쳐서 들러지기 때문에 이러한 과정에서의 슬래브의 파손을 방지할 수 있어야 한다. 그렇지 못할 경우에는 그림 2에 보인 바와 같이 슬래브가 파손이 되어 신속한 시공의 의미를 잃게 될 수 있다.



그림 2. 슬래브 리프팅 시의 파손

본 논문의 목적은 프리캐스트 포장의 시공을 위하여 프리캐스트 슬래브를 리프팅할 때 슬래브의 어느 위치를 리프팅하는 것이 가장 적합한가를 분석하는데 있다. 이를 위하여 먼저 미국의 Precast/Prestressed Concrete Institute (PCI)의 기준을 분석하고, 실제로 시험시공될 슬래브를 대상으로 구조해석을 수행하여 최적의 슬래브 리프팅 위치를 파악하였다. 또한 슬래브의 가로 세로 형상이 최적 리프팅 위치에 미치는 영향을 분석하였다.

2. PCI 기준

미국의 PCI에서는 프리캐스트 슬래브를 이용한 공사에서 시공 후 슬래브가 받는 하중보다 프리캐스트 슬래브를 제작하여 운반하고 설치할 때 슬래브에 작용하는 하중이 더욱 크게 작용할 수 있기 때문에 이에 대비한 기준을 마련하여 이 기준에 따라 프리캐스트 슬래브의 운반 및 시공이 이루어질 수 있도록 하고 있다 (PCI, 1985). 이 기준에서는 리프팅 시 슬래브 자중에 의한 하중에 안전률을 적용하여 하중의 4배 혹은 표 1에 의해 수정된 하중의 2.5배를 적

표 1. Equivalent static load multiplier¹ (PCI, 1985)

Stripping		
Product Type	Finish	
	Exposed aggregate with retarder	Smooth mold (form oil only)
Flat, with removable side forms, no false joints or reveals	1.2	1.3
Flat, with false joints and/or reveals	1.3	1.4
Fluted, with proper draft ⁴	1.4	1.6
Sculptured	1.5	1.7
Yard handling ² and erection ³		
All products	1.2	
Travel ²		
All products	1.5	

1. These factors are used in flexural design of panels and are not to be applied to required safety factors on lifting devices. At stripping, suction between product and form introduces forces, which are treated here by introducing a multipliers based on the actual contact area and a suction factor independent of product weight.
2. Certain unfavorable conditions in road surface, equipment, etc., may require use of higher values.
3. Under certain circumstances may be higher.
4. For example, tees, channels and fluted panels.

용하여 설계 및 시공이 이루어지도록 한다. 이렇게 안전율을 적용하는 이유는 슬래브를 제작하여 거푸집에서 빼낼 때 과도한 하중이 작용할 수 있으며, 또한 리프팅시나 운반시에 동적인 하중이 작용할 수 있기 때문이다.

또한 PCI 기준에서는 프리캐스트 슬래브를 거푸집에서 빼내거나, 운반하기 위하여 트레일러에 실을 때, 또한 현장에 안치시킬때에 가장 안전한 최적 리프팅 위치 선정방법을 기술하고 있다. 이러한 리프팅 위치는 슬래브에 작용하는 모멘트 값을 고려하여 선정한다. 그림 3에서 보는 바와 같이 4점을 리프팅 할 때 가로, 세로를 각각 1차원 보로 가정하여 자중이



등분포 하중이라고 가정하고 리프팅 위치가 보의 지지점이라고 가정한 후 모멘트 분포를 계산하여 정모멘트와 부모멘트가 같아지도록 하는 위치가 최적의 리프팅 위치로 선정된다. 왜냐하면 보의 응력은 모멘트에 비례하며 정모멘트와 부모멘트가 같아지는 점을 지지점으로 할 때 보에서의 최대응력을 다른 지점을 선택했을 때에 비해 최소로 유지할 수 있기 때문이다. 만약에 지점이 바깥쪽으로 치우치면 정모멘트가 증가하여 중앙부에서의 응력이 커지게 되며 반대로 지점이 안쪽으로 치우치면 지점에서의 부모멘트가 증가하여 지점에서의 응력이 커지게 된다. 이렇게 하여 계산된 최적의 리프팅 지점은 자유단으로부터 보 전체 길이의 0.207배 되는 위치에 있게 된다. 이러한 최적 리프팅 지점은 수직으로 리프팅할 때를 기준으로 계산된 값이며 단면의 중립축이 슬래브 상부와 하부의 정중앙에 존재할 때를 가정한 것이다. 설계자는 이러한 위치를 리프팅하였을 때 다음과 같은 허용 설계기준을 만족하는지를 분석하여야 한다.

- (1) 상하부면에 작용하는 응력이 균열을 유발시키는 응력보다 작아야 한다.
- (2) 만약 한쪽 면에 허용할 수 있는 균열을 가질 수 있다고 하면 다른 한 면에는 균열을 유발시키는 응력보다 작은 응력이 작용해야 한다.
- (3) 상하부면에 허용치 이내의 균열이 발생하도록

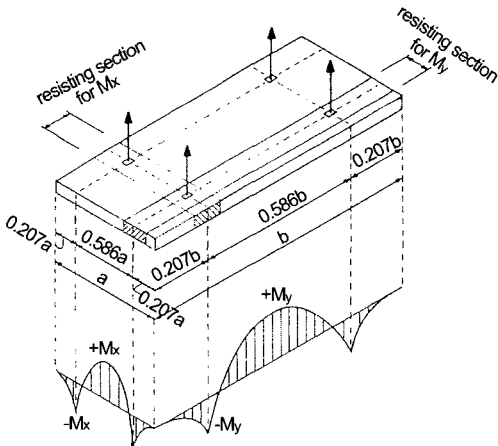


그림 3. PCI 기준에 의한 슬래브 리프팅 최적위치 (PCI, 1985)

하여야 한다.

PCI에 규정된 리프팅 위치는 슬래브가 아닌 보로 가정하여 단순하게 구했기 때문에 설계에 적용하기는 매우 편리하지만 2차원적인 슬래브에 대한 구조 해석을 수행하여 구하지 않았기 때문에 가로 세로 비율이 커서 보와 비슷한 슬래브에서는 정확성이 있지만 가로 세로 비율이 비슷해질수록 오차가 커질 것으로 예상된다. 또한 실제로 슬래브를 리프팅할 때는 수직으로 드는 것이 아니라 어느 정도의 각도를 유지하며 들게 되므로 이때 생기는 축방향력을 무시하고 있다. 그리고 리프팅 위치가 슬래브의 중립축이 아니라 실제로는 중립축보다 위쪽을 들게 되므로 이때 생기는 모멘트도 무시하게 된다. 따라서 이러한 효과를 제대로 분석하는 구조해석이 필요하다고 할 수 있다.

3. 최적 리프팅 위치 선정을 위한 구조해석 방법

프리캐스트 콘크리트 슬래브를 유한요소법을 이용하여 모델링하기 위하여 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS(ABAQUS, 2005)를 사용하였다. 시험시공에 사용될 슬래브의 크기는 종방향 길이가 3m, 횡방향 길이가 1.8m, 슬래브 두께가 15cm이기 때문에 이러한 크기의 슬래브 유한요소 해석 모형을 개발하였다. 콘크리트 슬래브는 쉘요소를 사용하여 모델링하였으며 유한요소는 한 번이 1cm의 정사각형 모양을 사용하였다. 리프팅은 슬래브의 네 개의 위치에 강선을 연결한 후 기중기를 사용하여 수행할 것이기 때문에 리프팅 위치는 서로 대칭이 되게 된다. 따라서 해석 시에는 슬래브의 1/4만 고려하여 해석하였다. 이러한 대칭을 이용한 해석을 수행할 때는 경계조건을 적합하게 만들어야 한다. 대칭이 되는 선상에서는 대칭선 주위로의 회전에 대한 자유도를 구속하였으며 대칭선이 평행하게 이동할 수 있는 방향의 자유도도 구속을 하였다. 하지만 대칭선이 선의 방향으로 이동하는 자유도와 슬래브의 깊이 방향으



로 이동하는 자유도는 허용을 하였다. 하중은 콘크리트 슬래브의 자중만을 고려하였다.

슬래브를 리프팅하는 지점에는 리프팅을 위한 철제봉 등을 슬래브에 묻게 된다. 이러한 철제봉의 영향을 고려하기 위하여 슬래브 구조해석 모형에 한 변의 길이가 4cm인 정사각형 모양의 철제를 슬래브의 리프팅 위치에 삽입하였다. 해석 모형에서 철제봉을 삽입하지 않고 콘크리트의 지점을 직접 리프팅하는 모형을 사용하면 리프팅 지점의 콘크리트에 응력 집중 현상이 매우 크게 나타나게 되어 실제의 거동과는 다른 결과를 얻을 수 있기 때문이다.

슬래브를 리프팅하면 리프팅을 한 지점에는 부모멘트가 걸리게 되고 슬래브의 중앙부에는 정모멘트가 걸리게 된다. 따라서 리프팅 지점에서는 슬래브의 상부에 인장응력이 작용하게 되며 반대로 슬래브의 중앙부에는 슬래브의 하부에 인장응력이 발생하게 된다. 콘크리트 슬래브는 인장응력이 인장강도에 다다를 때 균열이 생기며 파손되기 때문에 이러한 인장응력을 최소로 발생시킬 수 있는 위치를 리프팅 하는 것이 가장 바람직하다고 할 수 있다. 리프팅 위치가 슬래브의 안쪽에 치우쳐 있으면 리프팅 위치에서의 부모멘트가 증가하여 이곳의 슬래브 상부에서의 인장응력이 증가하게 되며, 반대로 리프팅 위치가 슬래브의 바깥쪽에 치우치게 되면 슬래브 중앙의 정모멘트가 증가하여 이곳의 슬래브 하부에서의 인장응력이 과대해진다. 따라서 리프팅 지점의 슬래브 상부에서의 인장응력과 슬래브 중앙부의 슬래브 하부에서의 인장응력이 같아지는 지점이 슬래브에 최소 인장응력을 발생시키는 지점이며 이러한 지점을 리프팅 하는 것이 가장 적절하다고 볼 수 있다.

4. 구조해석 결과

4.1 수직 리프팅 시 슬래브 거동

먼저 프리캐스트 슬래브를 수직으로 리프팅할 때

의 거동을 분석하였다. 그림 4는 슬래브의 표면에 생기는 최대 주응력 분포를 나타낸다. 슬래브의 1/4 대칭을 이용하여 해석하였기 때문에 그림도 전체 슬래브의 1/4 만 보여주고 있다. 그림에서 대칭축은 오른쪽과 아래쪽 변이며 이 후에 나오는 그림도 같은 대칭축이다.

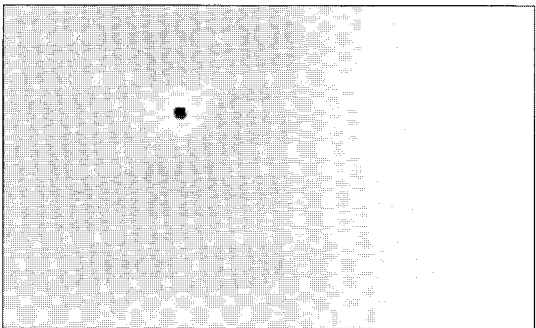


그림 4. 수직 리프팅 시 최대 주응력 분포

수직으로 리프팅할 때는 슬래브 표면의 응력분포가 상부 표면과 하부 표면에서 크기는 같고 인장과 압축만 바뀌기 때문에 그림 4로부터 상부와 하부 표면의 응력 분포를 알 수가 있다. 리프팅하는 지점 부근에서는 최대 주응력 분포가 지점을 중심으로 원형으로 퍼져 나가는 것을 볼 수 있으며 슬래브의 중앙부 쪽에서는 횡방향을 따라 비슷한 크기의 최대 주응력이 분포하는 것을 알 수 있다.

수직 리프팅시에 어느 점을 들어야 슬래브에 걸리는 최대 주응력이 가장 작아지는지를 분석하기 위하여 슬래브의 리프팅 지점을 2cm 단위로 변화시키며 수많은 해석을 수행하였다. 해석결과 그림 5에 나타난 것과 같이 슬래브 리프팅 지점을 슬래브의 중앙부로 이동시키면 중앙부의 하부 표면에 걸리는 인장 주응력이 감소하는 것을 알 수 있다. 반대로 지점 부분의 슬래브 상부 표면에 걸리는 인장 주응력은 증가하는 추세인 것을 알 수 있다. 그러나 지점부가 슬래브의 바깥쪽으로 어느 정도 이상 이동하면 주응력이 다시 커지게 되는 현상을 볼 수 있는데 이러한 이유는 주응력의 방향이 종방향이었다가 횡방향으로 바뀌기 때문이다. 최적 리프팅 위치는 이러한 중앙부와 지점

부의 응력이 교차하는 곳이라고 할 수 있다. 왜냐하면 다른 곳에서는 중앙부와 지점부 중 어느 한 부분에서는 응력이 작으나 그 반대의 부분에서는 응력이 매우 커지게 되기 때문이다.

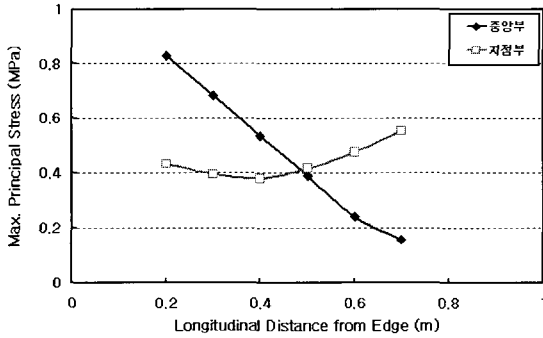


그림 5. 수직 리프팅 시 지점에 따른 주응력 변화

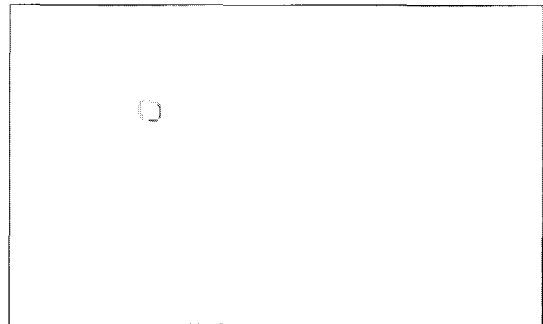
이러한 분석을 통하여 구한 최적 리프팅 위치는 슬래브의 바깥 모서리 부분에서 종방향으로 0.5m, 횡방향으로 0.38m가 되는 지점인 것으로 나타났다. 이러한 위치는 보의 휨을 이용하여 1차원적으로 단순 해석을 하여 구한 값인 끝단으로부터 보의 길이의 0.207이 되는 지점에 비해 종방향으로 12cm 바깥 쪽이 되는 위치이다. 이미 언급한 바와 같이 미국의 PCI는 보의 해석을 통해 얻은 0.207의 위치를 슬래브에서도 리프팅을 위해 사용하도록 되어 있으나 이러한 기준을 따르면 리프팅 위치가 슬래브 해석에서 구한 최적 위치보다 중앙부 쪽으로 향하기 때문에 리프팅 지점에서의 응력이 중앙부의 응력보다 커지는 경향을 나타낼 수 있다.

4.2 리프팅 경사각도의 영향

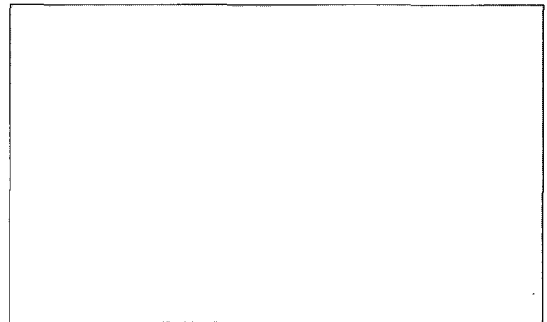
실제로 현장에서 슬래브를 리프팅할 때는 리프팅을 슬래브에 수직으로 하기는 용이하지 않다. 따라서 네 개의 리프팅 강선을 기중기의 한 지점에 걸고 이러한 네 개의 선이 슬래브의 각 리프팅 지점에 연결되기 때문에 리프팅 강선과 슬래브는 수직이 아닌 다른 각도의 경사를 가지게 된다. 이러한 경사각은 슬래브를 리프팅하였을 때 슬래브에 수평압축응력을

발생시키게 되어 수직 리프팅과는 다른 응력분포를 슬래브에 가하게 된다. 이러한 리프팅 경사각도의 영향을 분석하기 위하여 슬래브와 리프팅 강선과의 각도가 60도일 때와 30도일 때를 고려하여 수직 리프팅 시와 같은 구조해석을 수행하였다.

그림 6은 슬래브와 리프팅 강선과의 각도가 30도일 때 슬래브의 상부 표면과 하부 표면에 걸리는 최대 주응력 분포를 보여준다. 수직 리프팅 시에는 슬래브의 상하부 표면의 응력이 부호만 다르고 크기는 동일하였으나 리프팅 경사각도가 있을 경우에는 슬래브에 수평방향 압축력이 작용하므로 상하부 표면의 응력분포가 다르게 된다. 그림에서 볼 수 있듯이 상부 표면에서는 슬래브의 중앙부에 압축응력이 작용하여 수직 리프팅 시와는 뚜렷이 다른 최대 주응력 분포를 나타낸다. 하지만 슬래브 하부 표면에서는 수직 리프팅 시와 유사한 주응력분포를 보인다.



(a) 상부



(b) 하부

그림 6. 리프팅 경사각도가 30도일 때 최대 주응력 분포



리프팅 경사각도가 있을 때 최적 리프팅 지점을 선정하기 위하여 앞에서 설명한 바와 같은 해석을 수행하였다. 그림 7은 경사각도가 30도일 때 최적 위치로 선정된 지점의 횡방향 부근에서 종방향을 따라 중앙부와 지점부의 최대 주응력이 변화하는 모습을 보여 준다. 경향은 수직 리프팅 시와 매우 비슷하나 지점부의 최대 주응력을 평가하는 방법을 두 가지로 구분하였다. 우선 수평압축력이 슬래브의 리프팅 지점에 작용하면 그 주위에 응력집중 현상이 발생하여 그 부분만 매우 높은 응력을 보이게 된다. 하지만 실제로 리프팅할 때는 리프팅 지점 부근에 슬래브 대각선에 수직방향인 인장응력 방향으로 철근을 사용하여 보강하기 때문에 이러한 응력집중 현상 때문에 발생한 응력이 슬래브의 균열을 야기하지는 않는 것이 일반적이다. 따라서 본 연구에서는 리프팅 지점 부근의 응력집중 현상을 고려하여(허용하여) 분석하였을 때와 리프팅 지점 부근은 수직 리프팅 시의 응력만 고려하고 응력집중 현상은 무시한 경우로 나누어서 분석하였다.

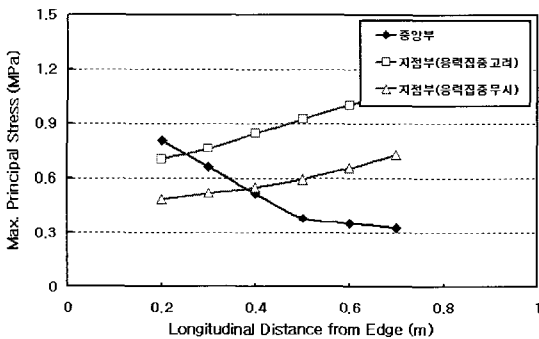


그림 7. 경사각도가 있을 때 리프팅 지점에 따른 주응력 변화

결과를 살펴보면 응력집중을 고려하였을 때는 최적 리프팅 위치가 응력집중을 고려하지 않았을 때에 비해 슬래브의 바깥쪽에서 생기는 것을 알 수 있다. 다시 언급하면 최적 리프팅 위치는 중앙부의 응력과 지점부의 응력이 교차하는 지점인데 이러한 교차점이 지점의 응력집중을 고려하면 슬래브의 더 바깥쪽에 생기게 되는 것이다. 또한 응력집중을 고려하였을

때의 지점부의 최대 인장 주응력은 응력집중을 고려하지 않았을 때의 최대 인장 주응력에 비해 큰 것을 알 수 있다.

4.3 리프팅 레벨의 영향

리프팅 경사각도가 있을 때의 영향을 고려하기 위하여 수평압축력을 슬래브에 가하였는데 이때의 가정은 슬래브의 중립축 위치인 슬래브 두께의 중간 깊이에 강선을 연결하였다는 것이다. 하지만 실제로 리프팅할 때는 그림 8과 같이 슬래브의 표면이나 표면에 가까운 부분을 들기 때문에 경사각도뿐만 아니라 수평 압축력과 중립축과의 편심에 의한 모멘트도 고려하여야 한다. 그림 9는 경사각 30도에서 리프팅 레벨이 중립축으로부터 15cm일 때의 최대 주응력 분포를 보여 준다. 리프팅 레벨이 15cm란 말은 편심이 중립축으로부터 15cm란 의미이다. 그림에서 알 수 있듯이 슬래브의 상하부 표면에 리프팅 지점 부근에서 매우 뚜렷한 응력집중 현상이 나타난다. 그 외의 부분은 경사각도만 고려하였을 때의 결과와 비슷한 것을 알 수 있다.

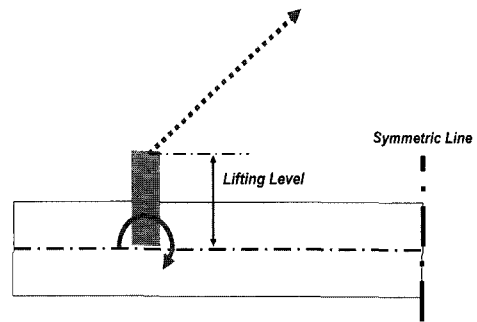
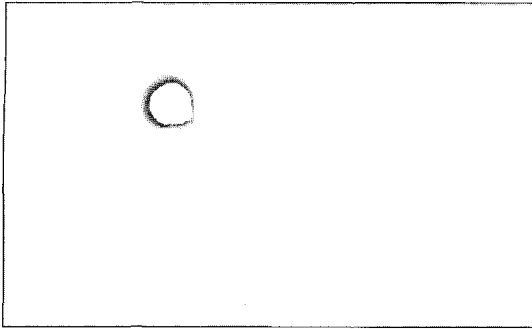
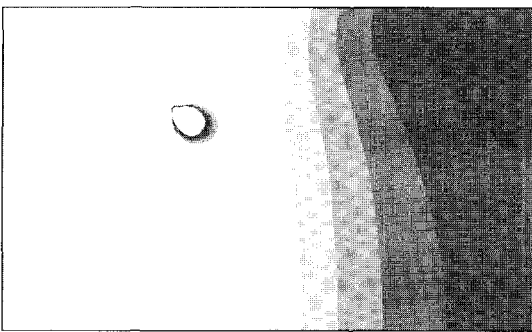


그림 8. 리프팅 레벨에 의한 편심

편심이 있을 때의 최적 리프팅 위치를 선정하기 위하여 이미 언급하였던 바와 같이 응력집중 현상을 고려하였을 때와 고려하지 않았을 때로 구분하여 분석을 수행하였다. 그림 10은 경사각 30도에서 편심이 15cm일 때 종방향을 따라 리프팅 위치별로 최대 주응력이 변화하는 것을 보여 준다. 편심에 의한 모멘



(a) 상부



(b) 하부

그림 9. 경사각 30도에서 리프팅 레벨이 15cm일 때 최대 주응력 분포

트 때문에 생기는 응력집중을 고려하면 중앙부의 응력과 교차점인 최적 리프팅 위치는 슬래브의 바깥쪽으로 이동하는 것을 알 수 있다. 일반적으로 일차원 보를 생각하면 리프팅시 편심에 의한 모멘트는 중앙부의 응력을 상하부에 모두 같은 크기로 방향만 다르게 증가 시키며 리프팅 지점에서 보의 중앙부 쪽으로 지점 부근의 응력을 감소시키게 되며 보의 바깥쪽

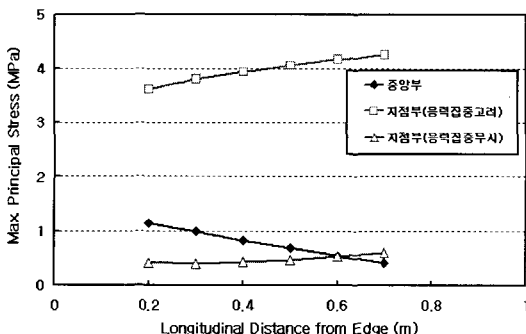
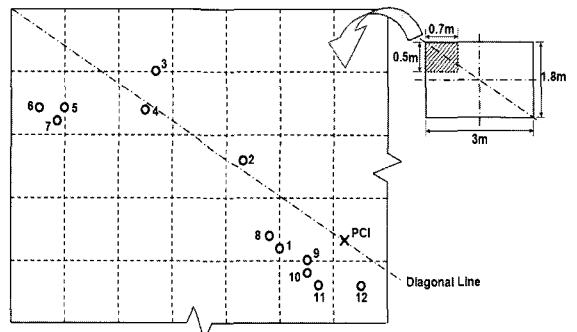


그림 10. 편심이 있을 때 리프팅 지점에 따른 주응력 변화

으로는 지점 부근의 응력에 변화를 주지 않아야 한다. 하지만 본 해석에서 알 수 있듯이 슬래브에서는 일차원 보와는 다소 다른 결과를 보이는 것을 알 수 있다. 또한 응력집중을 고려하였을 때와 고려하지 않았을 때의 응력 차이도 상당히 큰 것을 알 수 있다.

4.4 최적 리프팅 위치 선정

본 연구에서 구조해석을 통해 구한 최적 리프팅 지점을 경우에 따라 살펴보면 그림 11과 같다. 리프팅 지점부의 응력집중을 고려하면 리프팅 경사각도가 작아질수록(슬래브와 강선과의 각도가 작아질수록) 최적 리프팅 지점이 슬래브의 바깥쪽으로 이동하는 것을 알 수 있으며, 또한 리프팅 레벨도 증가할수록 최적 리프팅 위치가 슬래브 바깥쪽으로 변하는 것을 알 수 있다. 하지만 경사각도가 30도일 때는 리프팅 레벨이 증가하면 사실상 중앙부와 지점부의 응력이 같아지는 지점이 슬래브 내에 존재하지 않으며 이때는 서로 간의 응력차가 최소인 점이 최적 리프팅 지점이므로 결과가 다소 다르게 나타난다. 지점부를 보강하여 응력집중 현상을 무시하면 리프팅 경사각도에 의한 수평력은 최적 리프팅 지점을 다소 바깥쪽으로 이동시키며 편심에 의한 모멘트는 리프팅 최적 위



- 1 : 90°-0cm-고려 2 : 60°-0cm-고려 3 : 30°-0cm-고려
- 4 : 60°-7.5cm-고려 5 : 60°-15cm-고려 6 : 30°-7.5cm-고려
- 7 : 30°-15cm-고려 8 : 60°-0cm-무시, 30°-0cm-무시
- 9 : 60°-7.5cm-무시 10 : 60°-15cm-무시 11 : 30°-7.5cm-무시
- 12 : 30°-15cm-무시 (경사각-리프팅레벨-지점부 응력집중현상 고려 유무)

그림 11. 최적 리프팅 지점



치를 슬래브 안쪽으로 이동시킨다. 이렇게 구한 각 조건별 최적 리프팅 위치를 이용하여 그림 12에 보인 바와 같이 시험시공 시 리프팅을 수행하여 성공적인 시공을 할 수 있었다.

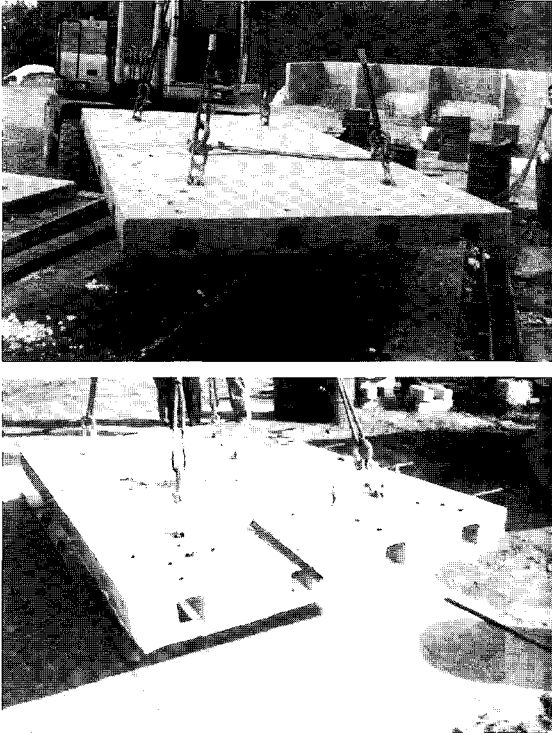


그림 12. 프리캐스트 포장 시험시공 시 슬래브 리프팅 광경

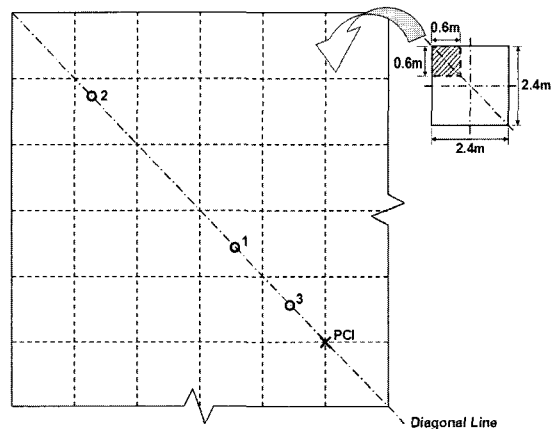
4.5 정사각형 슬래브의 최적 리프팅 위치

직사각형 형상을 갖는 시험시공될 슬래브의 최적 리프팅 위치 확인결과 최적 리프팅 위치가 리프팅 경사각이나 리프팅 레벨과 같은 조건들에 상관없이 대체적으로 대각선을 기준으로 짧은 변 쪽으로 약간 치우쳐진 부분에서 선정되었다. 슬래브의 형상이 직사각형이 아닌 정사각형이면 최적 리프팅 위치는 대각선상에 생길 것이며 이러한 위치가 리프팅 경사각과 리프팅 레벨에 따라서 변화하는 추세는 직사각형 슬래브일 때와 동일한지를 확인하기 위하여 정사각형 슬래브에 대한 구조 해석을 수행하였다. 해석에 사용한 정사각형 슬래브는 시험시공될 슬래브와 같은 면

적을 갖도록 하는 종방향과 횡방향 길이가 각각 2.4m, 슬래브 두께가 15cm인 형상을 선정하였으며, 리프팅 경사각 30도와 리프팅 레벨 15cm인 임계상태만을 고려하여 해석을 수행하였다.

그림 13에 나타낸 바와 같이 정사각형 슬래브의 최적 리프팅 지점을 보면 직사각형 슬래브에서와는 달리 긴 변과 짧은 변의 구분이 없기 때문에 어떠한 경우에서든지 최적 리프팅 지점은 슬래브의 대각선상에 존재한다. 그리고 리프팅 조건에 따른 최적 리프팅 지점은 직사각형 슬래브에서와 마찬가지로 리프팅 지점부에서 응력집중을 고려했을 경우 리프팅 경사각도가 90°에서 30°로 작아지면서(슬래브와 강선과의 각도가 작아지면서) 최적 리프팅 지점이 슬래브의 바깥쪽으로 이동하였으며, 또한 리프팅 레벨이 없을 때 보다 편심을 15cm로 주었을 때도 최적 리프팅 위치가 슬래브 바깥쪽으로 이동하는 것을 알 수 있었다. 그리고 직사각형 슬래브에서와 마찬가지로 경사각도를 30도로 유지하면서 동시에 리프팅 레벨을 15cm로 하였을 때 사실상 중앙부와 지점부의 응력이 비슷한 점이 슬래브 내에 존재하지 않음을 알 수 있었다.

지점부를 보강하여 응력집중 현상을 무시하면 리



1 : 90°-0cm-고려, 30°-0cm-무시

2 : 30°-0cm-고려

3 : 30°-15cm-무시

(경사각-리프팅레벨-지점부 응력집중현상 고려 유무)

그림 13. 정사각형 슬래브 최적 리프팅 지점



프팅 경사각을 30도로 하였을 때에는 응력집중현상을 고려하였을 때보다 최적지점이 안쪽으로 이동하였으며 수직으로 리프팅하였을 때와 같은 위치에서 최적 리프팅 지점이 나타났다. 응력집중현상을 무시하고 편심을 15cm로 주었을 때는 리프팅 최적 위치가 슬래브 안쪽으로 이동하였다. 하지만 구조해석 결과 모든 경우에서 PCI 기준상의 최적 리프팅 지점 위치보다는 바깥쪽에서 최적 리프팅 지점이 나타나는 것을 알 수 있었다.

5. 결 론

프리캐스트 포장을 시공하기 위하여 슬래브를 리프팅 할 때 슬래브에 미치는 손상을 최소화할 수 있는 최적의 슬래브 리프팅 위치를 선정하기 위하여 유한요소법을 이용한 구조해석을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

- 리프팅 지점의 보강이 충분하여 이곳의 응력집중 현상을 고려하지 않아도 될 경우에는 리프팅 경사각도에 의해 발생하는 수평력은 최적 리프팅 지점을 다소 바깥쪽으로 이동시키며 편심에 의해 발생하는 모멘트는 리프팅 최적 위치를 슬래브 안쪽으로 이동시킨다.
- 리프팅 지점의 보강을 생각하지 않고 이곳의 응력집중을 고려하면 리프팅 경사각도가 작아질수록 그리고 리프팅 레벨이 증가할수록 최적 리프팅 위치가 슬래브의 바깥쪽으로 이동하게 된다.
- 직사각형 슬래브의 최적 리프팅 위치는 대각선을 기준으로 짧은 변 쪽으로 치우친 곳에 생기게 된다.
- 정사각형 형상의 슬래브에서는 대각선상에서 최적 리프팅 지점이 선정되며 직사각형과 마찬가지로 지점부 응력집중 현상을 고려하지 않을 경우 리프팅 경사각도에 의해서 최적 리프팅지점이 바깥쪽으로 이동하며 편심에 의한 모멘트는 리프팅 최적지점을 안쪽으로 이동시킨다.

- 정사각형 슬래브에서 수직 리프팅 시 최적지점은 슬래브 바깥쪽에서부터 한 변의 약 0.146배 되는 지점에서 선정되었으며 시험시공된 직사각형 슬래브에서는 긴 변의 약 0.167배 되는 지점에서 최적 리프팅 지점이 선정되었다. 이는 1차원 보로 가정하여 해석한 PCI 기준인 0.207배 되는 지점보다는 바깥쪽에 위치하게 된다.
- 일차원 보를 이용하여 구한 최적 리프팅 위치는 슬래브 해석에 의해 구한 최적 위치보다 다소 안쪽에 있기 때문에 이러한 위치를 리프팅했을 경우에 지점 부근에서의 인장응력이 슬래브 중앙부의 인장응력보다 크게 되어 슬래브의 지점 부근에 손상을 입힐 수 있다. 따라서 슬래브 해석에 바탕을 두어 최적 리프팅 지점을 선정하는 것이 바람직하다.

감사의 글

본 연구는 한국도로공사 도로교통기술원의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- ABAQUS (2005). *User's Manual Version 6.5*, Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc., Pawtucket, R.I.
- Bull, J. W. (1991). "Precast concrete raft units," *Van Nostrand Reinhold, New York, NY*, 193 pp.
- Hargett, E. R. (1970). "Prestressed concrete panels for pavement construction," *PCI Journal, Precast/Prestressed Concrete Institute*, pp. 43-49.
- Merritt, D. K., McCullough, B. F., Burns, N. H., and Schindler, A. K. (2000). "The feasibility of using precast concrete panels to expedite highway pavement construction," Report 1517-1, Center for Transportation Research, *The University of Texas at Austin*, 168 pp.
- Merritt, D. K., McCullough, B. F., Burns, N. H., and Schindler, A. K. (2001). "Feasibility of



.....

precast prestressed concrete panels for expediting PCC pavement construction,” Report 1517-S, Center for Transportation Research, *The University of Texas at Austin*, 4 pp.

Merritt, D. K., McCullough, B. F., and Burns, N. H. (2002). “Construction and preliminary monitoring of the Georgetown, Texas precast prestressed concrete pavement,” Report 5-1517-1, Center for Transportation Research, *The University of Texas at Austin*, 168 pp.

Meyer, A. H. and McCullough, B. F. (1983).

“Precast repair of CRCP Pavements,” *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 109, No. 5, ASCE, pp. 615-631.

Precast/Prestressed Concrete Institute (1985). PCI Design Handbook—Precast and Prestressed Concrete, *Precast/Prestressed Concrete Institute, Chicago, Illinois*, 3rd ed.

접 수 일 : 2007. 2. 15

심 사 일 : 2007. 5. 14

심사완료일 : 2007. 5. 22