

프리캐스트 포장 시험시공을 위한 슬래브 리프팅 최적 위치 선정 연구

Optimum Lifting Positions on Precast Slabs for Precast Pavement Construction

김성민* · 조병휘** · 한승환*** · 서봉교****

Seong-Min Kim · Byoung Hooi Cho · Seung Hwan Han · Bong Kyo Seo

1. 서 론

콘크리트 슬래브를 공장에서 미리 제작하여 신설 도로 건설 또는 기존 도로의 보수에 사용하는 방식인 프리캐스트 포장은 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 통행 제한 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 플로리다 주에서는 철근이 없는 줄눈콘크리트포장 (JCP: Jointed Concrete Pavement)의 깨진 부분을 보수하기 위하여 프리캐스트 슬래브를 이용하였다. 보수공사는 야간에 이루어 졌으며 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 캘리포니아 주에서는 벤추라 고속도로의 콘크리트포장을 프리캐스트 슬래브를 이용하여 보수하였고, 뉴욕 주에서는 태판지교의 틀게이트 부분의 포장을 프리캐스트 슬래브로 보수하였다. 도로포장 뿐 만 아니라 공항포장에서도 프리캐스트 슬래브를 사용한 보수가 미국의 워싱턴 덜러스 국제공항에서 시행된 바 있다. 기본 개념은 도로포장의 보수와 동일하며 비행기 이착륙이 적은 야간에 시공되었다.

프리캐스트 포장은 보수 뿐 만 아니라 신설 도로의 건설에도 사용되었다. 프리캐스트 조립식 매트 슬래브는 미국 육군에 의해 미사일 운반대로 처음 개발 되었다 (Bull, 1991). 제작과정 중 슬래브의 횡방향으로 프리텐션을 가하며 슬래브 연결 시 종방향으로 프리스트레스를 가하여 슬래브를 연결하였다. 미국 텍사스 주에서는 2002년 프리캐스트 프리스트레스 콘크리트 슬래브를 이용하여 연장 1 km 가 넘는 길이의 도로를 시범 신설하였다 (Merritt et al., 2000, 2001, 2002). 프리캐스트 콘크리트 슬래브를 연속하여 70 m 이상 배열한 후, 종방향으로 포스트텐션을 주어 슬래브를 연결하였으며, 횡방향으로는 슬래브를 제작할 때 프리스트레스를 주어 제작하였다.

이와 같이 프리캐스트 포장은 유지보수용과 신설용으로 미국에서는 사용되어 왔다. 이에 한국도로공사는 이러한 프리캐스트 포장의 고속도로 본선 및 영업소 포장 등에 대한 적용 가능성을 분석하기 위한 연구를 시작하였다. 프리캐스트 포장을 건설하기 위해서는 슬래브를 공장에서 제작한 후 일단 슬래브를 들어서 적당한 위치에 내려놓아 시공 시까지 보관을 하며 시공 시에는 다시 들어서 운반용 트럭에 적재를 하여 시공현장까지 운반을 하며 또 다시 슬래브를 트럭에서 들어서 시공 위치에 안착을 시키게 된다. 이와 같이 프리캐

* 정회원 · 경희대학교 토목건축대학 토목공학전공 조교수 · 공학박사

** 경희대학교 토목건축대학 토목공학과 석사과정

*** 정회원 · 한국도로공사 도로교통기술원 수석연구원

**** 경희대학교 토목건축대학 토목공학과 학사과정

스트 슬래브는 여러 차례에 걸쳐서 들러지기 때문에 이러한 과정에서의 슬래브의 파손을 억제할 수 있어야 한다. 그림 1은 프리캐스트 슬래브를 리프팅(Lifting)하는 장면과 이러한 과정에서 파손을 입은 장면을 보여 준다. 본 논문에서는 프리캐스트 포장의 시험시공을 위하여 프리캐스트 슬래브를 리프팅할 때 슬래브의 어느 위치를 리프팅하는 것이 가장 적합한가를 분석하기 위하여 구조 해석을 수행한 결과를 기술하고자 한다.

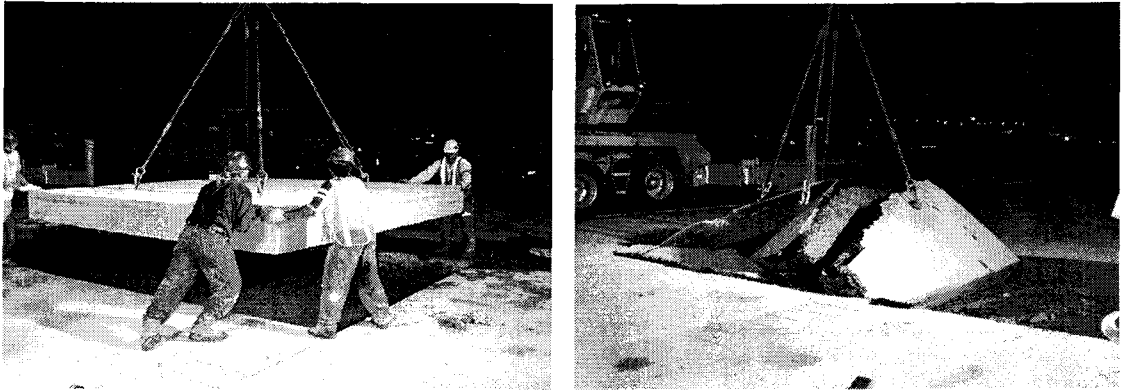


그림 1. 프리캐스트 슬래브의 리프팅

2. 구조해석 모형 및 리프팅 최적 위치 선정 이론

프리캐스트 콘크리트 슬래브를 유한요소법을 사용하여 모델링하였다. 시험시공에 사용될 슬래브의 크기는 종방향 길이가 3 m, 횡방향 길이가 1.8 m, 슬래브 두께가 15 cm 이기 때문에 이러한 크기의 슬래브 유한요소 해석 모형을 개발하였다. 콘크리트 슬래브는 쉘요소를 사용하여 모델링 하였으며 유한요소는 한 변이 1 cm 의 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 1/4 만 고려하여 해석하였다. 이러한 대칭을 이용한 해석을 수행할 때는 경계 조건을 적합하게 만들어야 한다. 대칭이 되는 선상에서는 대칭선 주위로의 회전에 대한 자유도를 구속하였으며 대칭선이 평행하게 움직이는 방향의 자유도도 구속을 하였다. 하지만 대칭선이 선의 방향으로 이동하는 자유도와 슬래브의 깊이 방향으로 이동하는 자유도는 허용을 하였다.

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

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 이 곳의 슬래브 상부에서의 인장응력이 증가하게 되며, 반대로 리프팅 위치가 슬래브의 바깥쪽에 치우치게 되면 슬래브 중앙의 정모멘트가 증가하여 이 곳의 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.



3. 수직 리프팅 시 슬래브 거동

먼저 프리캐스트 슬래브를 수직으로 리프팅 할 때의 거동을 분석하였다. 그림 2는 슬래브의 표면에 생기는 최대 주응력 분포를 나타낸다. 슬래브의 1/4 대칭을 이용하여 해석하였기 때문에 그림도 전체 슬래브의 1/4 만 보여주고 있다. 수직으로 리프팅 할 때는 슬래브 표면의 응력 분포가 상부 표면과 하부 표면에서 크기는 같고 인장과 압축 만 바뀌기 때문에 그림 2로 상부와 하부 표면의 응력 분포를 알 수가 있다. 리프팅 하는 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.

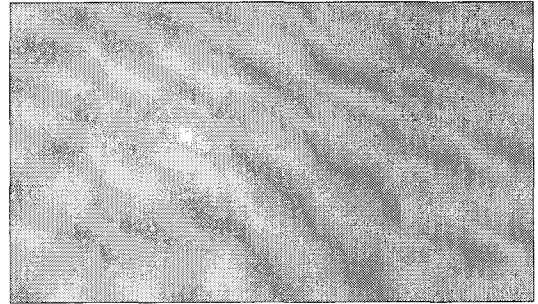


그림 2. 수직 리프팅 시 최대 주응력 분포

수직 리프팅 시에 어느 점을 들어야 슬래브에 걸리는 최대 주응력이 가장 작아지는 지를 분석하기 위하여 슬래브의 리프팅 지점을 2 cm 단위로 변화시키며 수백번의 해석을 수행하였다. 해석 결과 그림 3에 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. 그리고 지점부가 슬래브의 바깥쪽으로 이동하면 주응력이 다시 커지게 되는 현상을 볼 수 있는데 이러한 이유는 주응력의 방향이 종방향이었다가 횡방향으로 바뀌기 때문이다. 최적 리프팅 위치는 이러한 중앙부와 지점부의 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. 이렇게 분석을 통하여 구한 최적 위치는 슬래브의 바깥모서리 부분에서 종방향으로 0.5 m 횡방향으로 0.38 m가 되는 지점인 것으로 나타났다. 이러한 위치는 보의 휨을 이용하여 1차원적으로 단순 해석을 하여 구한 값인 끝단으로 부터 보의 길이의 0.207이 되는 지점에 비해 종방향으로 12 cm 바깥쪽이 되는 위치이다. 미국의 PCI (Precast and Prestressed Concrete Institute)는 보의 해석을 통해 얻은 0.207의 위치를 슬래브에서도 리프팅을 위해 사용하도록 되어 있으나 이러한 기준을

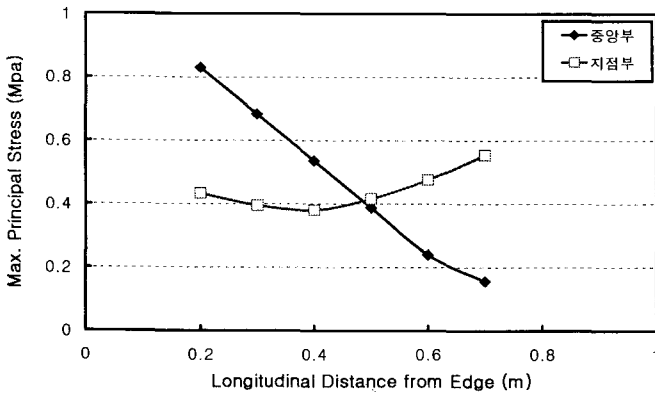


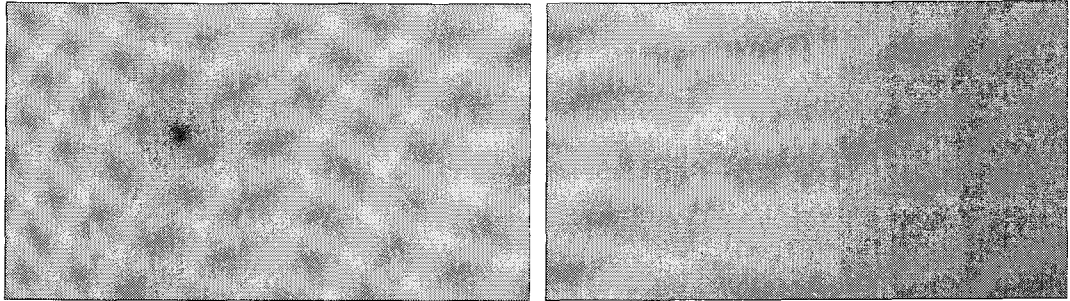
그림 3. 수직 리프팅 지점에 따른 주응력 변화

따르면 리프팅 위치가 슬래브 해석에서 구한 최적 위치 보다 중앙부 쪽으로 향하기 때문에 리프팅 지점에서 응력이 중앙부의 응력보다 커지는 경향을 나타낼 수 있다.

4. 리프팅 경사각도의 영향

실제로 현장에서 슬래브를 리프팅 할 때는 리프팅을 슬래브에 수직으로 하기는 용이하지 않다. 따라서 네 개의 리프팅 강선을 기준기의 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 리프팅 하였을 때 슬래브에 수평압축응력을 발생시키게 되어 수직 리프팅과는 다른 응력 분포를 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 4는 슬래브와 리프팅 강선과의

각도가 30도일 때 슬래브의 상부 표면과 하부 표면에 걸리는 최대 주응력 분포를 보여 준다. 수직 리프팅 시에는 슬래브의 상하부 표면의 응력이 부호만 다르고 크기는 동일하였으나 리프팅 경사각도가 있을 경우에는 슬래브에 수평방향 압축력이 작용하므로 상하부 표면의 응력 분포가 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 주응력 분포를 보인다.



(a)

(b)

그림 4. 리프팅 경사각도가 30도일 때 최대 주응력 분포: (a) 상부 표면, (b) 하부 표면

리프팅 경사각도가 있을 때 최적 리프팅 지점을 선정하기 위하여 앞에서 설명한 바와 같은 해석을 수행하였다. 그림 5는 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. 수평 압축력이 슬래브의 리프팅 지점에 작용하면 그 주위에 응력집중 현상이 발생하여 그 부분만 매우 높은 응력을 보이게 된다. 하지만 실제로 리프팅 할 때는 리프팅 지점 부근을 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. 결과를 살펴보면 응력집중을 고려하였을 때는 최적 리프팅 위치가 응력집중을 고려

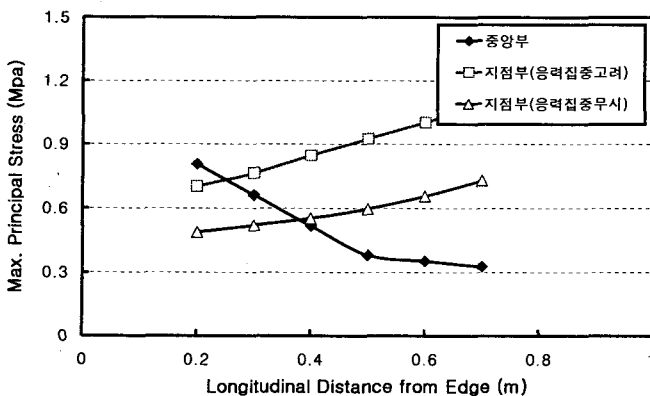


그림 5. 경사각도가 있을 때 리프팅 지점에 따른 주응력 변화

강선을 연결하였다는 것이다. 하지만 실제로 리프팅 할 때는 슬래브의 표면이나 표면에 가까운 부분을 들기 때문에 경사각도 뿐 만 아니라 수평 압축력과 중립축과의 편심에 의한 모멘트도 고려하여야 한다. 그림 6은

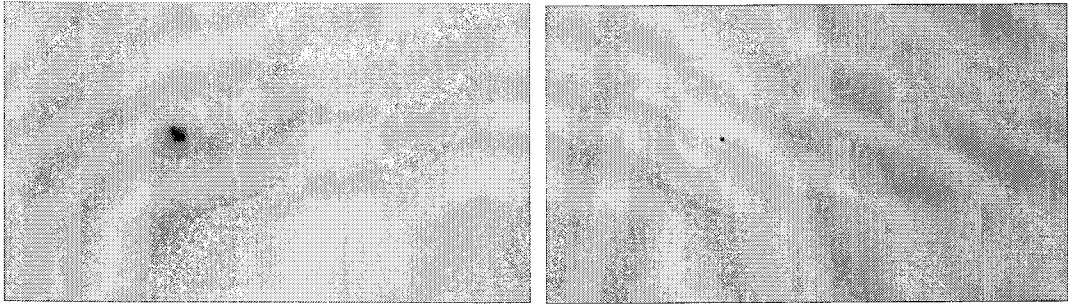
하지 않았을 때에 비해 슬래브의 바깥쪽에서 생기는 것을 알 수 있다. 다시 언급하면 최적 리프팅 위치는 중앙부의 응력과 지점부의 응력이 교차하는 지점인데 이러한 교차점이 지점의 응력집중을 고려하면 슬래브의 더 바깥쪽에 생기게 되는 것이다. 또한 응력집중을 고려하였을 때의 지점부의 최대 인장 주응력은 응력집중을 고려하지 않았을 때의 최대 인장 주응력에 비해 다소 큰 것을 알 수 있다.

5. 리프팅 레벨의 영향

리프팅 경사각도가 있을 때의 영향을 고려하기 위하여 수평압축력을 슬래브에 가하였는데 이 때의 가정은 슬래브의 중립축 위치인 슬래브 두께의 중간 깊이에



경사각 30도에서 리프팅 레벨이 중립축으로부터 15 cm 일 때의 최대 주응력 분포를 보여 준다. 리프팅 레벨이 15 cm 란 말은 편심이 15 cm 란 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.



(a) (b)

그림 6. 경사각 30도에서 리프팅 레벨이 15 cm일 때 최대 주응력분포: (a) 상부 표면, (b) 하부 표면

편심이 있을 때의 최적 리프팅 위치를 선정하기 위하여 이미 언급하였던 바와 같이 응력집중 현상을 고려하였을 때와 고려하지 않았을 때로 구분하여 분석을 수행하였다. 그림 7은 경사각 30도에서 편심이 15 cm 일 때 종방향을 따라 리프팅 위치별로 최대 주응력이 변화하는 것을 보여 준다. 편심에 의한 모멘트 때문에 생기는 응력집중을 고려하면 중앙부의 응력과 교차점인 최적 리프팅 위치는 슬래브의 바깥쪽으로 이동하는 것을 알 수 있다. 일반적으로 일차원 보를 생각하면 리프팅 시 편심에 의한 모멘트는 중앙부의 응력을 상하부에 모두 같은 크기로 방향만 다르게 증가 시키며 리프팅 지점에서 보의 중앙부 쪽으로는 지점 부근의 응력을 감소시키게 되며 보의 바깥쪽으로는 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.

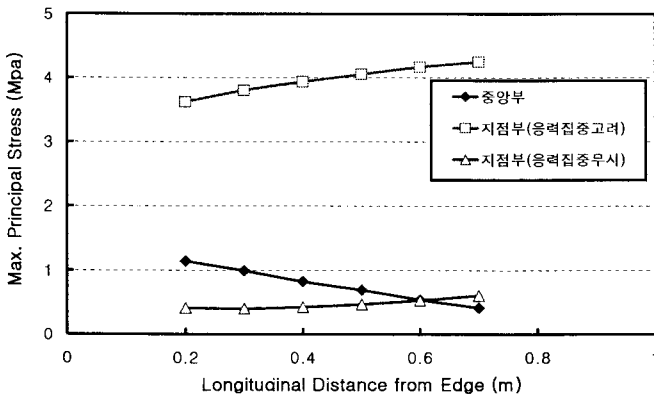


그림 7. 편심이 있을 때 리프팅 지점에 따른 주응력 변화

게 나타난다. 지점부를 보강하여 응력집중 현상을 무시하면 리프팅 경사각도에 의한 수평력은 최적 리프팅 지점을 다소 바깥쪽으로 이동시키며 편심에 의한 모멘트는 리프팅 최적 위치를 슬래브 안쪽으로 이동시킨다.

본 연구에서 구조해석을 통해 구한 리프팅 최적 지점을 경우에 따라 살펴보면 그림 8과 같다. 리프팅 지점부의 응력 집중을 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 비슷한 점이 슬래브 내에 존재하지 않으며 이 때는 서로 간의 응력차가 최소인 점이 최적 리프팅 지점이므로 결과가 다소 다르

- 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)

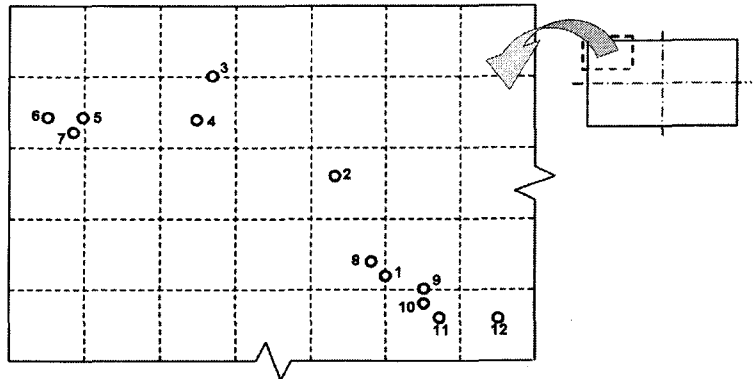


그림 8. 최적 리프팅 지점

5. 결론

프리캐스트 포장의 슬래브를 리프팅 할 때 슬래브에 미치는 손상을 최소화 할 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 의한 수평력은 최적 리프팅 지점을 다소 바깥쪽으로 이동시키며 편심에 의한 모멘트는 리프팅 최적 위치를 슬래브 안쪽으로 이동시킨다.
- 일차원 보를 이용하여 구한 최적 리프팅 위치는 슬래브 해석에 의해 구한 최적 위치 보다 다소 안쪽에 있기 때문에 이러한 위치를 리프팅 했을 경우에 지점 부근에서의 인장 응력이 다소 증가할 수 있다.
- 리프팅 지점의 보강을 고려하지 않고 이곳의 응력집중을 고려하면 리프팅 경사각도가 작아질수록 그리고 리프팅 레벨이 증가할수록 최적 리프팅 위치가 슬래브의 바깥쪽으로 이동하게 된다.

본 연구에서 수행한 해석 결과를 검증하고 슬래브 해석에 기반을 둔 프리캐스트 슬래브의 리프팅 지침서를 개발하기 위해서는 실물을 이용한 실험이 추후에 병행되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국도로공사 도로교통기술원의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 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.
2. Bull, J. W. (1991). "Precast concrete raft units," Van Nostrand Reinhold, New York, NY, 193 pp.
3. 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 7-1517-1, Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin.
4. 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.
5. 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.