다웰바 종방향유동에 따른 콘크리트 포장의 거동 분석

Analysis of Concrete Pavement Behavior by Longitudinal Movement of Dowel Bar

정성원* · 이재훈** · 손덕수*** · 정진훈****

Jeong, Sung Won · Lee, Jae Hoon · Sohn, Deuk Su · Jeong, Jin Hoon

1. 서 론

줄눈 콘크리트 포장(JCP: Jointed Concrete Pavement)은 온도와 습도 변화로 인한 균열발생을 예방하기 위해 시공과정에서 '인위적인 균열'인 줄눈을 설치한다. 줄눈은 불연속면이기 때문에 교통하중의 분산이 이루어지지 않는다. 따라서, 이를 보완하기 위해서 줄눈에는 인접 슬래브로 하중을 분산시켜주는 역할을 하는 하중전달장치(일반적으로 다웰바)를 설치한다(이재훈 외, 2010). 이는 슬래브에 발생하는 응력을 감소시켜 줄 뿐만 아니라 슬래브간의 부등침하로 발생하는 단차를 감소시켜주는 역할을 수행한다(그림 1). 그러나 시공시의 충격이나 진동 등의 변수들로 인해 콘크리트 슬래브 속에 매설된 다웰바는 수평·수직 위치 및 방향에 따라 유동을 하게 된다(그림 2). 다양한 연구결과를 통해서 수평·수직엇갈림은 줄눈부의 스폴링이나 균열을 유발할 수 있으며, 각 방향으로의 유동은 하중전달률을 감소시킬 수 있는 것으로 밝혀졌다(Tayabji, S.D., 1986).

또한, 국내에서는 다웰바의 시공 상태에 대한 명확한 기준이 제시되어 있지 않고 "설계 도면에 따라 정확한 위치에 설치해야 한다(한국도로공사, 고속도로공사 전문시방서)"라고만 규정되어 있다. 이러한 모호한 규정은 다웰바의 시공에 대한 중요성을 저하시키고 결국 다웰바 시공에 대한 품질관리를 어렵게 하고 있다(시멘트 콘크리트 포장생산 및 시공지침, 2009). 비록 "줄눈 시멘트 콘크리트 포장의 다웰바는 종방향유동 ±50mm 범위 내에서 시공해야한다(시멘트 콘크리트 포장생산 및 시공지침, 2009)"라는 국내 시공상태 기준이 있으나 이는 국외 자료만을 참고로 하여 설정한 기준이므로 국내 상황에 맞는 시공기준이라 하기는 어렵다. 따라서 국외 자료만을 참고로 하여 설정한 기준을 따를 것이 아니라, 국내 상황에 맞는 다웰바의 시공상태 기준에 대한 설정이 필요하다고 판단된다.

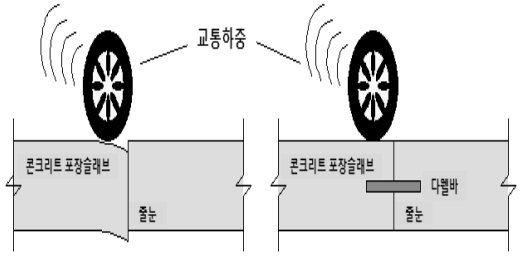
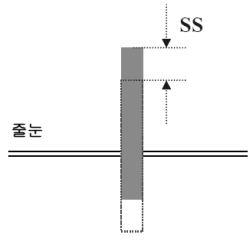


그림 1. 줄눈 콘크리트 포장에서의 다웰바의 역할



종방향유동
(SS, Side Shift
or Longitudinal Translation)

그림 2. 다웰바의 종방향유동(이재훈외, 2007)

본 연구에서는, 두께가 서로 다른 줄눈 콘크리트 포장(300mm, 280mm)을 유한요소법을 이용하여 각각 모델링

* 학생회원 · 인하대학교 토목공학과 석사과정(E-mail : beast38@hanmail.net) -발표자-
** 정 회 원 · 한국도로공사 도로교통연구원 선임연구원(E-mail : ranian74@ex.co.kr)
*** 정 회 원 · 한국도로공사 도로교통연구원 선임연구원(E-mail : mgsds@ex.co.kr)
**** 정 회 원 · 인하대학교 토목공학과 부교수 · 공학박사(E-mail : jhj@inha.ac.kr)

하고 이러한 포장에 환경하중은 제외한 교통하중만을 재하하였다. 그리고 다웰바의 종방향유동을 변수로 하여 줄눈부 다웰바의 하중전달률(Load Transfer Efficiency) 및 슬래브의 지압응력의 영향을 파악하였다.

2. 현장조사

2.1 다웰바자동삽입(DBI) 시험시공구간 1차 현장조사

콘크리트 포장의 공용성 증진을 목적으로, 기존의 다웰바 어셈블리 방법이 아닌 다웰바자동삽입(Dowel Bar Automatic Insertion) 방법을 이용하여 시험시공한 대전-당진건설사업단 6공구 시험시공 구간에 대해 2008년 9월에 현장조사를 실시하였다(그림 3). 현장조사는 1, 2차로 172개 줄눈에 대해서 비파괴조사장비를 이용해서 다웰바 시공상태를 측정하였으며, 측정결과 시험시공구간의 다웰바 종방향유동이 기존시공구간보다 많이 발생하였다. 국내의 다웰바 시공상태 기준을 보면 "줄눈 시멘트 콘크리트 포장의 다웰바는 하중전달 및 단차감소의 성능을 발휘하기 위해서 종방향유동 ±50mm 범위 내에서 시공해야한다(시멘트 콘크리트 포장생산 및 시공지침, 2009)"고 규정하고 있다. 시험시공구간의 종방향유동은 평균 45.8mm, 표준편차 20.8mm로 42.4%가 잠정기준에서 벗어났다(그림 4). 이에 따라 종방향유동 발생이 포장체에 미치는 영향에 대한 추가 조사가 필요하였으며, 국내 다웰바 시공상태 기준에 대한 검증이 필요하게 되었다.

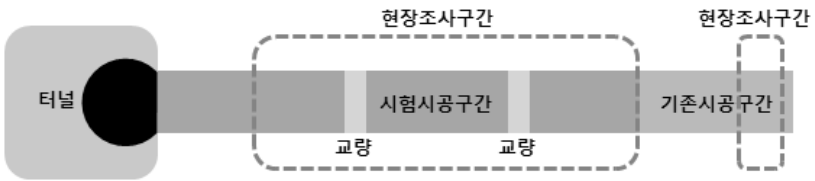


그림 3. 대전-당진건설사업단 6공구 현장조사 구간

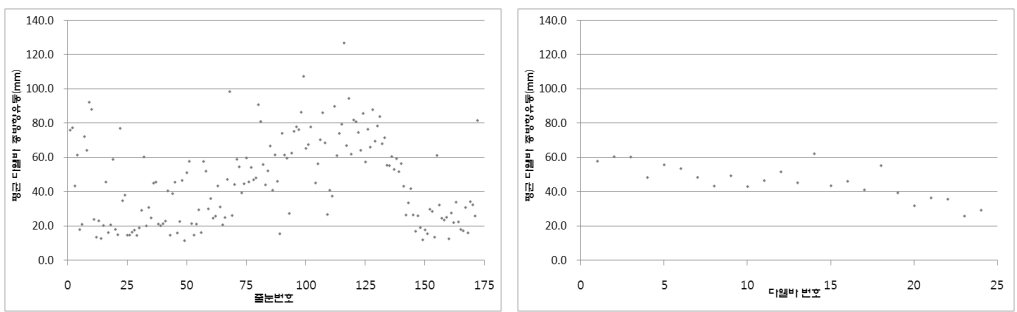


그림 4. 시험시공 구간 다웰바 종방향유동 분포(손덕수 외, 2009)

2.2 다웰바자동삽입(DBI) 시험시공구간 2차 현장조사

다웰바의 종방향유동이 포장의 공용성에 미치는 영향을 분석하기 위해 2008년 12월 대전-당진건설사업단 6공구 시험시공구간에 대해 다웰바의 종방향유동에 따른 하중전달률의 변화를 측정하였다. 시험장비는 HWD(Heavy Weight Deflectometer)를 이용하였으며 총 19개의 줄눈을 선정하여 휠패스가 통과하는 3번과 4번 다웰바 사이에 하중을 가하였다. 그 후, 해당 줄눈에서의 하중전달률을 측정하였다. 그 결과, 최대종방향유동량은 175.7mm이며 이 줄눈의 하중전달률은 89.5%로 높게 나타났다. 또한 종방향유동이 잠정기준(±50mm) 이상으로 발생한 줄눈에서 80% 이상의 하중전달률이 측정되어 역학적 측면에서 문제가 없음을 보여주었다(그림 5). 현장조사 결과를 모사하기 위해서 본 연구에서는 3차원 유한요소모델을 구축하였으며, 구조해석 결과와 현장조사 결과를 비교·분석 하였다.

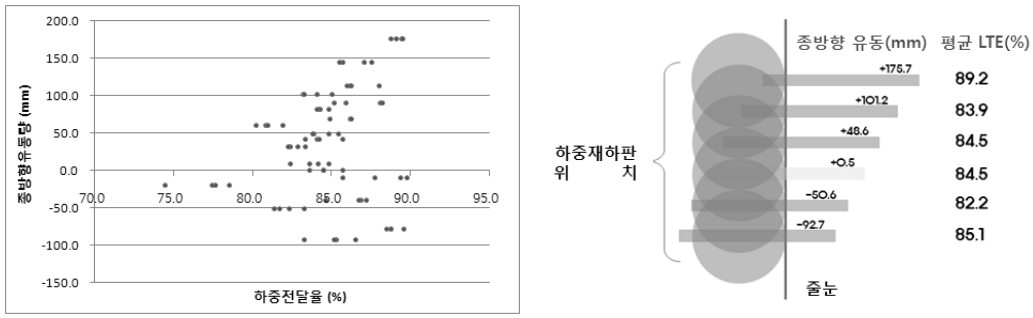


그림 5. 다웰바 종방향유동과 하중전달률(손덕수 외, 2009)

3. 3차원 유한요소모델 구축

3.1 유한요소모델 구성

본 연구의 모델은 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS 6.10을 이용하여 구축하였으며, 하드웨어의 능력을 고려한 1/2모델을 사용하여 분석을 수행하였다. 콘크리트 슬래브, 린 콘크리트, 다웰바는 각각 8절점 3차원 Solid 요소를 사용하였으며, 슬래브와 린 기층, 슬래브와 다웰바, 하중재하 슬래브와 인접 슬래브 사이의 상호작용은 모두 Contact 모델을 사용하였다. Contact 모델을 사용하는 이유는 슬래브와 린 기층, 슬래브와 다웰바, 하중재하 슬래브와 인접 슬래브 사이가 서로 완전 접착상태가 아닌 분리된 상태이기 때문이다. 이는 두 층이 접착상태로 거동하는 경우보다 강성이 떨어지는 상태를 표현할 수 있게 된다(유태석 외, 2006). 그리고 슬래브를 지지하는 하부층은 하나의 복합지지층으로 가정하여 Elastic Foundation(탄성 지반)으로 모델링하였다. 그림 6과 같이 다웰바가 위치한 줄눈부에서는 슬래브의 종방향으로 500mm와 다웰바 부근의 요소망을 세밀하게 제작하여 해석의 신뢰도를 높일 수 있도록 하였다.

콘크리트 슬래브 길이는 3,000mm, 폭은 2,090mm, 두께는 300mm를 적용하여 서로 대칭인 두 개의 슬래브 모델을 개발하였다. 그리고 줄눈부는 다웰바로 연결하였다. 다웰바의 제원은 직경 32mm, 길이 500mm로 하였으며, 하나의 슬래브에 6개가 장착 되도록 구성하였다(그림 7). 여기서 다웰바의 장착 위치는 대전-당진6공구 시험시공 구간에 실제로 설치된 위치임을 밝힌다. 또한 기층의 길이는 6000mm, 폭은 2090mm, 두께는 150mm를 적용하였다. 그리고 슬래브 두께 변화에 따른 콘크리트의 거동 분석을 위해 두께 280mm의 슬래브를 추가로 구축하여 구조해석 결과를 비교하였다.

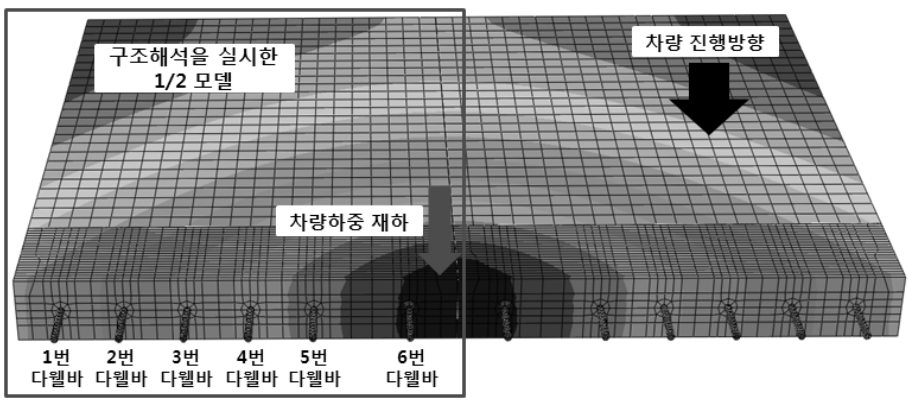


그림 6. 슬래브 및 다웰바의 요소망 구성과 다웰바 위치(Full Model)

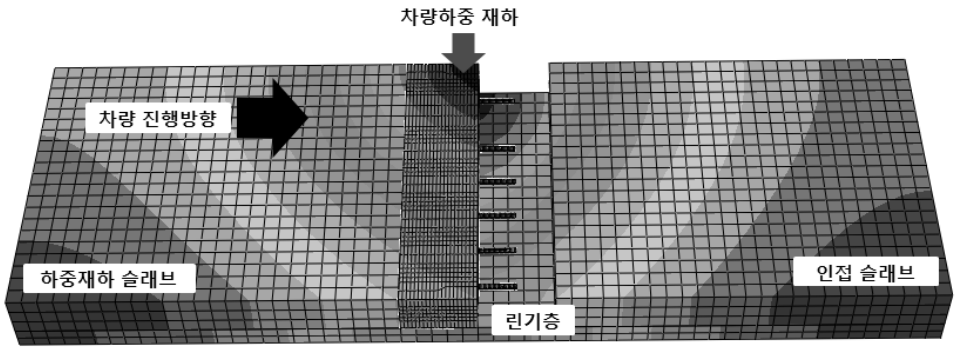


그림 7. 슬래브 두께별 구조해석을 실시한 유한요소모델 개발(1/2 Model)

3.2 유한요소모델의 물성 및 해석방법

유한요소모델에 사용된 물성값은 표 1과 같다. 슬래브 상부에 재하된 교통하중의 크기는 4.1ton의 표준축하중을 적용하였으며, 재하면적은 가로 20cm, 세로 20cm로 가정하여 줄눈 중앙부 위치에 재하 시켰다. 그리고 슬래브 두께가 300mm, 280mm일 때 다웰바의 종방향유동을 0mm, 50mm, 100mm, 150mm, 200mm의 5가지 상태로 변화시키며 각각의 해석을 실시하였다. 구조해석 결과는 환경하중과 줄눈 폭 변화는 고려하지 않았으며 교통하중과 자중에 의한 결과를 보여준다. 또한 각각의 해석결과는 슬래브와 다웰바의 접촉면 상태에 따라 크게 2가지(Contact 모델, Tie 모델)로 나누어서 해석하였는데, Contact 모델의 경우 현장시험시공 구간의 상태를 모사하기 위해 수직방향으로의 접촉은 Hard Contact로 하고, 수평방향의 접촉은 마찰계수를 0.3만큼 주어 마찰을 일으키며 다웰바가 유동하도록 하였다. 그리고 현장상태와의 비교분석을 위해 Tie 모델을 채택하여 슬래브와 다웰바가 일체로 거동하도록 하였다.

표 1. 유한요소모델에 사용된 물성

구 분	탄성계수 (GPa)	밀도 (t/m^3)	포아슨비
표층콘크리트	28	2.4	0.18
린 콘크리트	15	2.2	0.20
다웰바	200	7.0	0.26
노상	0.03*	-	-

* 지지력계수(MPa/mm)

4. 결과 분석

4.1 다웰바 종방향유동에 따른 하중전달률(LTE) 비교

다웰바의 종방향유동에 따른 하중전달률(LTE)의 효과를 비교하기 위하여 표 2, 표 3과 같이 각각의 유한요소모델에 대하여 교통하중을 재하한 줄눈 중앙부 위치(6번 다웰바 상부)에서의 슬래브 평균처짐을 비교, 분석하였다. 그 결과, Contact 모델보다 Tie 모델이 슬래브와의 일체거동으로 인해 처짐이 적게 발생하였고, 슬래브 두께 감소로 인한 영향으로 280mm보다 300mm 슬래브가 더 적은 처짐을 보였다(그림 8). 또한, 인접 슬래브에서도 처짐이 발생한 것으로 보아 교통하중이 다웰바를 통해 인접 슬래브로 전달된 것을 알 수 있다. 그림 9에서 Tie 모델의 경우는 슬래브와의 일체거동을 통해 LTE가 거의 일정한 값을 가지나, Contact 모델의 경우는 종방향유동이 150mm를 넘으면, 하중재하 슬래브의 하중전달률이 급격하게 떨어졌다. 이 결과는 다웰바의 종방향유동이

150mm 이상 발생할 경우, 다웰바의 하중전달기능이 급격히 감소함을 보여준다.

표 2. 교통하중 재하시 다웰바 유동에 따른 슬래브(300mm) 최대처짐값 및 하중전달률(LTE)

다웰바 유동		0mm	50mm	100mm	150mm	200mm
Contact 모델 최대처짐(mm)	하중재하 슬래브	0.166009	0.166008	0.166009	0.166033	0.167685
	인접 슬래브	0.138475	0.138478	0.138484	0.138437	0.136899
LTE(%)		83.414	83.416	83.419	83.379	81.641
Tie 모델 최대처짐(mm)	하중재하 슬래브	0.150166	0.150173	0.150198	0.150290	0.150668
	인접 슬래브	0.132076	0.132079	0.132099	0.132181	0.132538
LTE(%)		87.953	87.952	87.950	87.950	87.967

표 3. 교통하중 재하시 다웰바 유동에 따른 슬래브(280mm) 최대처짐값 및 하중전달률(LTE)

다웰바 유동		0mm	50mm	100mm	150mm	200mm
Contact 모델 최대처짐(mm)	하중재하 슬래브	0.178751	0.178749	0.178751	0.178780	0.180433
	인접 슬래브	0.150049	0.150052	0.150056	0.150009	0.148423
LTE(%)		83.943	83.945	83.947	83.907	82.260
Tie 모델 최대처짐(mm)	하중재하 슬래브	0.163867	0.163872	0.163890	0.163972	0.164344
	인접 슬래브	0.144854	0.144855	0.144868	0.144941	0.145291
LTE(%)		88.397	88.395	88.393	88.394	88.407

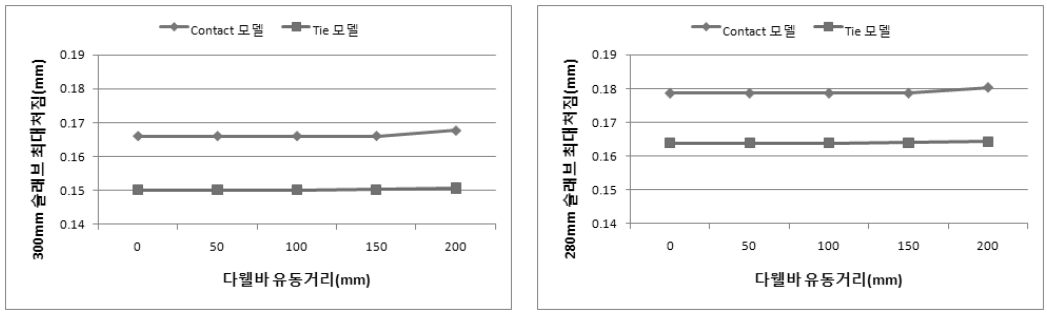


그림 8. 두께별 슬래브와 다웰바 간의 접촉상태에 따른 최대처짐 비교(하중재하 슬래브의 최대처짐)

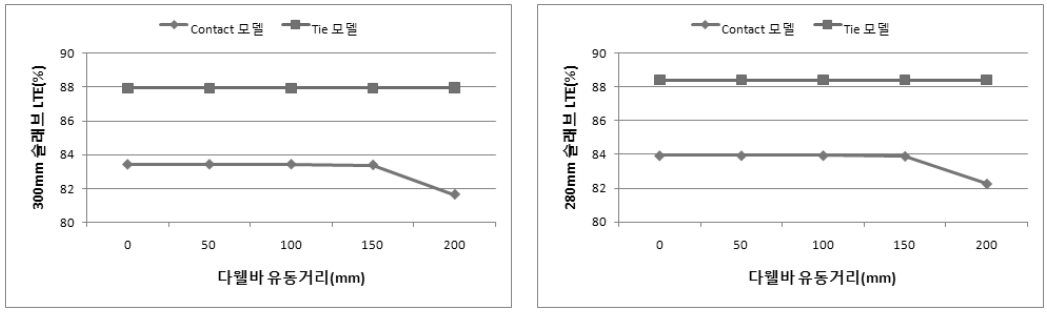
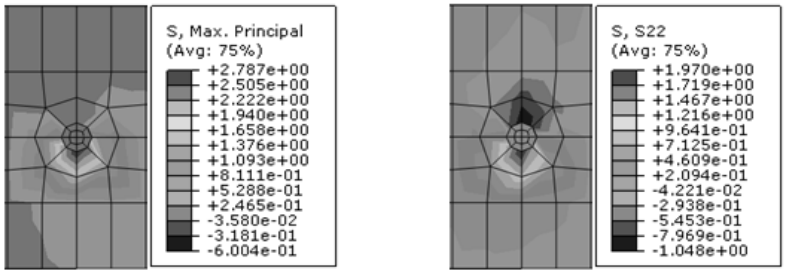


그림 9. 두께별 슬래브와 다웰바 간의 접촉상태에 따른 하중전달률(LTE) 비교

4.2 다웰바 종방향유동에 따른 슬래브 지압응력 비교

교통하중의 재하로 인해서 가장 큰 응력의 영향을 받는 6번 다웰바에 대하여 다웰바 종방향유동에 따른 응력재하 슬래브 주변의 최대 인장응력 및 최대 지압응력을 검토하였다. 각각의 유한요소모델에 대하여 응력검토는 줄눈 중앙부 표면(6번 다웰바 설치면)을 검토하였으며, 중앙부 표면의 검토이유는 응력재하 슬래브와 인접 슬래브가 만나는 줄눈부에서 최대응력이 발생했기 때문이다(그림 10).



(a) 최대 인장응력 (b) 최대 지압응력

그림 10. 다웰바 주변의 응력 검토 예

최대 인장응력의 경우 표 4, 그림 11과 같이 Contact 모델과 Tie 모델 모두 다웰바의 유동이 커질수록, 슬래브 두께가 얇을수록 증가하였다. 이는 다웰바의 유동이 커질수록 교통하중에 대한 다웰바의 응력전달 감소가 발생하며, 슬래브 두께가 얇아지면 다웰바 상부의 슬래브가 휨 거동에 의해 더욱 취약해지므로 인장응력은 더욱 커지게 된다. 그리고 Contact 모델과 Tie 모델 모두 최대 인장응력이 1.5MPa~3MPa 사이의 값을 보였으며 이는 역학적으로는 큰 문제가 없는 것으로 나타났다.

표 4. 다웰바 유동에 따른 교통하중 재하시 최대 인장응력

다웰바 유동		0mm	50mm	100mm	150mm	200mm
Contact 모델 최대응력(MPa)	하중재하 슬래브(300mm)	1.518	1.518	1.520	1.549	1.601
	하중재하 슬래브(280mm)	1.767	1.768	1.770	1.805	1.880
Tie 모델 최대응력(MPa)	하중재하 슬래브(300mm)	2.787	2.788	2.790	2.798	2.859
	하중재하 슬래브(280mm)	3.237	3.237	3.239	3.247	3.316

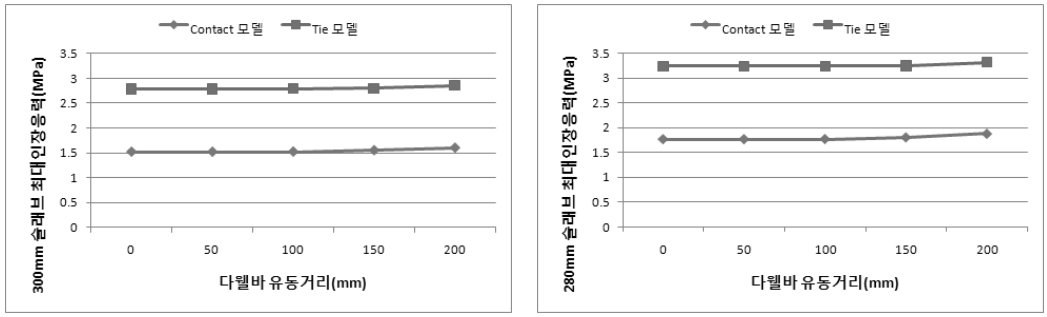


그림 11. 다웰바 유동에 따른 교통하중 재하시 최대 인장응력

최대 지압응력의 경우는 다웰바 길이방향과 연직방향인 콘크리트 최대압축력을(S22 응력) 보았다. 실제 지압응력은 다웰바 주변의 모든 node에 대하여 그 응력 추이를 검토해야 하지만 여기서는 6번 다웰바 근처에 발생한 최대 압축응력을 지압응력이라고 밝힌다. 표 5, 그림 12와 같이, 다웰바의 유동이 커질수록 Contact 모델의 경우 지압응력이 증가하였고 Tie 모델의 경우는 지압응력이 감소하였다. Contact 모델의 지압응력 증가이유는 다웰바의 길이가 짧아지면서 다웰바와 슬래브가 접하는 접지면 감소로 인한 응력 분배가 불리해지며 응력집중현상이 발생했기 때문이다. 반면에 Tie 모델의 경우는 다웰바와 슬래브가 완전부착 상태를 유지하기 때문에 하중전달에 있어서 아무런 문제가 발생하지 않으며 이것이 지압응력의 감소를 초래하였다. 또한 Contact 모델의 경우가 Tie 모델보다 지압응력이 2배이상 발생한 이유로는 Contact 모델에서 종방향 유동을 허용하였으므로 접촉면의 상호작용으로 인한 영향으로 보여진다.

표 5. 다웰바 유동에 따른 교통하중 재하시 최대 지압응력

다웰바 유동		0mm	50mm	100mm	150mm	200mm
Contact 모델 최대응력(MPa)	하중재하 슬래브(300mm)	-2.489	-2.489	-2.489	-2.533	-2.694
	하중재하 슬래브(280mm)	-2.771	-2.771	-2.771	-2.823	-3.031
Tie 모델 최대응력(MPa)	하중재하 슬래브(300mm)	-1.048	-1.048	-1.045	-1.035	-1.022
	하중재하 슬래브(280mm)	-1.111	-1.111	-1.108	-1.097	-1.082

(최대 지압응력의 (-)는 압축응력을 나타냄)

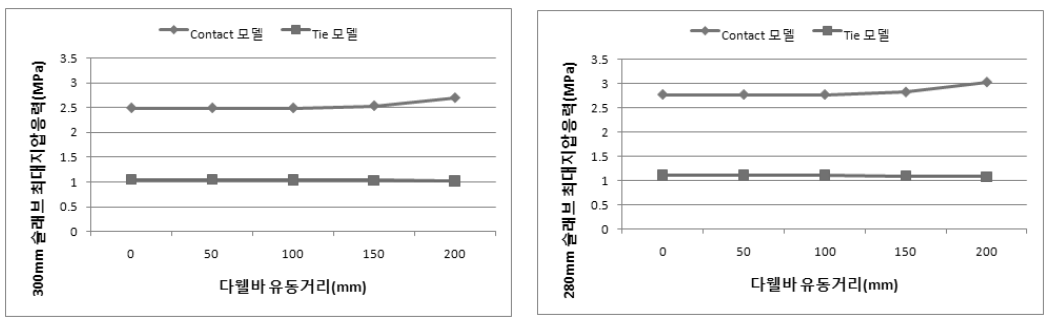


그림 12. 다웰바 유동에 따른 교통하중 재하시 최대 지압응력

5. 결론 및 향후 연구 계획

콘크리트 포장 줄눈부에서 교통하중이 재하될 때 다웰바의 종방향유동에 따른 하중전달률(LTE) 및 슬래브에 발생하는 응력 분포를 분석하였다.

(1) 다웰바가 0mm에서 200mm까지 이동함에 따라 하중전달률은 감소하는 경향을 보였다. 종방향유동에 관한 국내 시공기준은 ±50mm이지만, 구조해석 결과 종방향유동이 이 범위를 넘어서도 다웰바의 하중전달률이 80% 이상으로 유지되었으므로, 교통하중과 자중만의 영향을 고려했을 때 종방향유동은 ±150mm까지 허용할 수 있을 것으로 예상된다.

(2) 최대 인장응력의 경우 Contact 모델과 Tie 모델 모두 다웰바의 유동이 커질수록 증가하였다. 이는 다웰바의 유동이 커질수록 교통하중에 대한 다웰바의 응력전달률이 감소함을 보여준다. 또한 슬래브 두께가 얇을수록 최대 인장응력은 증가하였는데 280mm의 슬래브 두께에서도 최대 인장응력이 3MPa 이내로 발

생함으로써 역학적으로는 큰 문제가 없는 것으로 나타났다.

(3) 최대 지압응력의 경우는 6번 다웰바 근처에 발생한 최대 압축응력을 검토하였으며 다웰바의 유동이 커질수록 Contact 모델의 경우 지압응력이 증가하였고 Tie 모델의 경우는 지압응력이 감소하였다. Contact 모델의 지압응력 증가이유는 다웰바의 길이 감소로 인한 응력집중현상 발생이 원인이며, Tie 모델의 지압응력 감소 이유는 다웰바와 슬래브가 완전부착 상태를 유지하기 때문에 하중전달률의 감소가 발생하지 않았기 때문이다. 또한 Contact 모델의 경우가 Tie 모델보다 지압응력이 2배 이상 발생한 이유로는 Contact 모델에서의 접촉면 상호작용으로 인한 영향으로 보여진다.

본 연구에서는 교통하중과 포장자중만을 고려하였다. 하지만 실제로 다웰바는 교통하중 뿐만 아니라 환경하중에 의해 유동을 하게 된다. 향후 연구진행 방향은 온도하중의 적용에 따른 슬래브의 거동을 분석할 것이며 줄눈 벌어짐 정도, 탄성지반의 강성값 변화, 다웰바와 슬래브 접촉면의 마찰계수 변화 등에 의한 영향력 역시 파악할 것이다. 이와 같은 종합적인 결과를 종합하여 국내 상황에 맞는 적정 다웰바 길이를 제시할 수 있을 것으로 판단된다.

참고 문헌

[1] 국토해양부 (2009), “시멘트 콘크리트 포장 생산 및 시공 지침”, pp.63-74

[2] 이재훈 (2010), “다웰바 설치를 통한 콘크리트 포장 횡방향 균열의 하중전달률 보강”, 한국도로학회 학술대회논문집, pp.435-440

[3] 손덕수 (2009), “다웰바 자동삽입 공법의 현장 공용성 검증”, 한국도로학회 학술대회논문집, pp.451-456

[4] 유태석 (2006), “줄눈 콘크리트포장 3차원 유한요소모델의 민감도 분석”, 대한토목학회눈문집, 제26권, 제3D호, pp.435-444

[5] 전범준 (2010), “3차원 유한요소해석을 이용한 줄눈콘크리트 포장의 다웰바 최적배치에 대한 연구”, 대한토목학회논문집, 제30권, 제2D호, pp.135-141

[6] Tayabji, S.D. (1986), “Dowel Placement Tolerances for Concrete Pavements”, In Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board, No.1062, TRB, National Research Council, Washington, D.C.