동적유한요소해석에 의한 FWD 시험의 모델링

Numerical Simulation of FWD Test using ABAQUS

백종은* · 최준성** · 김수일***

1. 서 론

포장도로는 지속적인 차량하중과 기후조건등 환경적인 영향에 의해서 구조적 능력이 감소되어 결국은 한계 공용상태에 이르게 된다. 그러므로, 적절한 시기에 포장구조체의 구조평가를 실시한 후 보수·보강을 거쳐 도로의 주행성, 안정성 및 쾌적성을 유지해야 한다. 이를 위해서는 사용중인 포장도로를 손상시키지 않고 현장에서 직접 시험할 수 있는 비파괴시험의 사용이 증가추세에 있다. 이러한 비파괴시험 중 FWD(Falling Weight Deflectometer)시험은 시험과정이 간단하고 실제의 교통하중의 크기를 가장 근사하게 묘사할 수 있기 때문에 많이 사용되고 있다.

포장도로의 구조적능력을 평가하는 비파괴시험장비 FWD의 충격하중의 영향범위는 6~7m로 알려져 있다. 그러나 아스팔트 포장도로가 절토부와 같이 기반암의 깊이가 6~7m보다 상대적으로 얕은 깊이에 존재하는 곳에 건설되는 경우에는 기반암이 포장구조체의 거동에 많은 영향을 미치게 되므로 정확한 해석을 할 수가 없다. 이러한 기반암의 영향을 고려하기 위해서는 우선 기반암의 깊이를 정확하게 추정하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 FWD 비파괴시험장비로부터 측정된 표면처짐의 특성을 기반암깊이에 따라 분석하고자 동적 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS 를 이용하여 FWD 비파괴시험을 모델링하고, 이를 현장시험 데이터를 이용하여 검증하였다.

2. FWD 시험의 모델링

동적 유한요소프로그램인 ABAQUS를 이용해서 FWD 시험을 모델링하기 위하여 그림 1과 같이 동적물성에 대한 동적처짐의 검증을 실시하였다. 해석에 사용할 입력 물성은 FWD 현장시험에 의한 실제 표면처짐을 포장구조체의 동적인 거동을 반영할 수 있도록 의사 정적 역해석 프로그램인 DYN-BAL을 이용하여 역산한 값을 사용하였다. 그리고, FWD시험을 대표할 수 있는 2차원 축대칭요소를 이용해서 FWD 시험을 모델링하고, 이 모델을 검증하기 위해서 FWD 시험에 의한 실제 동적표면처짐과 FWD 시험 모델을 수치해석한 표면처짐을 비교하였다.

---

* 정회원 · 한국도로공사 도로연구소 지반연구실 연구원 · pocketdream@hanmail.net
** 정회원 · 인덕대학 토목환경과 전임강사 · soilpave@mail.induk.ac.kr
*** 정회원 · 연세대학교 공과대학 사회환경건축공학부 교수 · geotech@yonsei.ac.kr

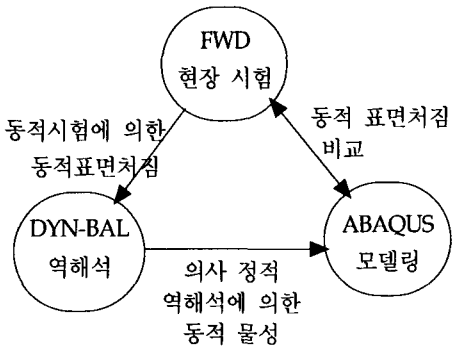

그림 1. FWD 시험의 모델링의 개요

3. 해석 모델

FWD시험을 모델링하기 위해서 FWD시험에 의한 충격하중을 모사하고 포장구조체의 크기와 경계조건을 최적화하였다. 해석대상인 아스팔트 콘크리트 포장구조체는 우리나라의 경우 4층 구조로 아스팔트 콘크리트 표층, 안정처리기층, 보조기층, 노상으로 이루어져 있다. 노상의 아래에는 연암 이상의 물성을 가지는 기반암이 존재하고, 이때 기반암은 독립된 하나의 해석층으로 고려하지 않고 경계조건으로 가정하였다.

FWD시험은 원형의 재하판에 충격하중을 가한 후 일정한 거리에서 표면처짐을 구하는 시험이기 때문에 그림 2 와 같이 해석지반을 축대칭요소를 가지는 2차원 요소를 사용하여 모델을 설정하였다. 본 해석에서는 아스팔트 표층을 6개, 안정처리기층을 3개, 보조기층을 6개, 노상은 기반암의 깊이에 따라서 두께가 달라지므로 6~47 개로 분할하여 구성하였다. 이 때 깊이별로 구분된 상반된 매질사이의 각 층은 완전히 부착되었다고 가정하였다.

유한요소해석에 있어서 요소의 크기는 일반적으로 작을수록 정확한 해석이 가능하나 총 요소수의 증가를 가져오고 이는 해석시간의 증가를 초래하게 된다. 그러나 동적 유한요소해석에서 파의 파장에 비해 상대적으로 요소의 크기가 크게 되면, 파의 전파특성을 제대로 묘사하지 못하기 때문에 적절한 크기의 요소를 사용해야 한다. 본 연구에서는 동적해석시 충분한 파의 전파특성을 구현하기 위한 최적의 요소를 Kuhlemeyer와 Lysmer이 제안한 방법을 이용, 최소 2.5× 5.0cm 에서 최대 10.0× 10.0cm 로 요소의 크기를 제한하여 동적해석을 수행하였다. 경계조건은 기반암으로 가정한 바닥의 경우에는 연직 방향으로 응력과 변형률이 전혀 발생하지 않는 것으로 가정하므로 y 방향으로 구속되는 경계조건을 사용하였고 측면부는 x방향으로만 변위를 구속하는 경계조건으로 설정하였다. FWD시험에서 발생하는 충격하중을 구현하기 위해서 여러가지 실제 하중곡선을 평균한 평균 FWD하중을 사용하였다. 그림 3은 평균 FWD 하중곡선을 도시한 것이다. FWD 하중에서 최대하중은 4.1ton이며, 지속시간은 0.33초이다.

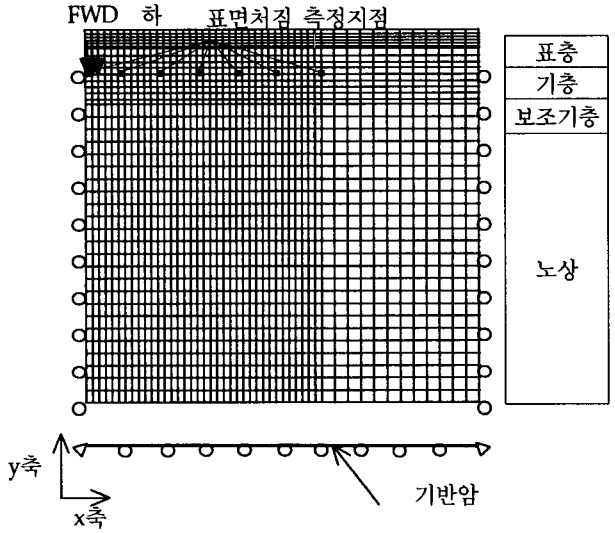

그림 2. FWD 시험의 해석모델

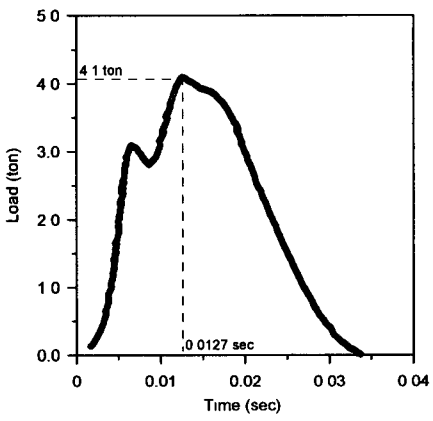

그림 3. 평균 FWD 하중곡선

4. 입력 물성

FWD 수치모델에 사용되는 탄성계수를 구하기 위해서 FWD 현장시험으로부터 구한 표면처짐을 역해석하여 사용하였다. 표 1은 본 연구에서 사용한 FWD 수치모델을 검증하기 위해서 사용된 FWD 현장시험자료로, 1997년 원주 동화폐도에서 계절별로 동일한 단면에 대해서 FWD 시험을 수행하여 포장구조체의 표면처짐과 표면온도를 나타낸 것이다. 포장구조체에서 온도변화가 가장 큰 아스팔트 콘크리트의 온도에 따른 물성변화를 고려하기 위해서 계절별로 실시한 FWD 시험자료를 사용하였다. FWD 시험에서 하중은 단계별로 변하기 때문에 최대하중이 4.1ton인 경우에 발생되는 표면처짐을 정규화하였다.

표 1. 4.1 ton 정규화 하중에 의한 FWD 현장시험자료 (오후 3-4시경)

시험	계절	표면온도 (℃)	시험전 5일간 평균 대기온도	정규화한 FWD 표면처짐 (micron)						
				W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7
1	봄	30.1	14.5	137.61	98.51	75.10	55.71	41.38	31.29	24.53
2	여름	48.1	23.4	205.36	115.15	79.22	54.48	39.27	29.82	23.69
3	가을	22.0	13.6	107.45	81.39	64.23	49.50	38.28	29.51	23.07
4	겨울	6.7	8.4	92.40	75.00	61.38	48.81	38.47	30.05	23.79

포장구조체 각 층의 탄성계수는 FWD 현장시험에서 구해진 표면처짐을 의사정적 역해석 프로그램인 DYN-BAL을 사용해서 추정한 의사정적탄성계수를 사용하였다. 표 2 는 FWD 수치모델에 사용되는

물성을 나타낸 것이다. 동해석에 많은 영향을 미치는 감쇠비는 노상은 일반적으로 동적해석시에 많이 사용되고 있는 5%를 사용하였고, 나머지 층은 2%를 사용하였다. 포아송비와 단위중량은 일반적인 포장구조체에 많이 사용하는 대표적인 값을 사용하였다.

표 2. DYN-BAL 에 의해서 역산된 포장구조체의 물성

물성 / 층	두께 (cm)	탄성계수(kg/cm²)				포아송비	감쇠비	단위중량 (ton/m³)
		시험 1	시험 2	시험 3	시험 4			
표 층	15	26000	11000	46000	62000	0.3	0.02	2.35
안정처리기층	15	85000	29000	60000	130000	0.3	0.02	2.35
보조기층	30	4100	3900	9000	8800	0.35	0.02	2.30
노 상	540	1800	1900	1800	1700	0.4	0.05	1.91

5. FWD 수치모델의 검증

표 2에서 구한 포장구조체의 탄성계수로부터 수치해석을 수행하여 각 측점에서의 표면처짐을 구한 후, 실제 표면처짐과 비교하여 FWD 수치모델을 검증하였다. 그림 4는 표층의 온도가 48.1 ℃로 4개의 단면 중에 가장 높은 표면 온도인 단면에 대해서 FWD 하중이 가해진 후 0.06초 동안에 발생한 거리별 표면처짐을 나타낸 것이다. 그림 4에서 나타낸 7개의 표면처짐곡선으로부터 처짐값이 최대인 값을 연결한 것을 표면처짐곡선이라고 한다. 그림 5는 수치해석에 의해서 구한 표면처짐곡선과 FWD시험에 의해서 구한 표면처짐곡선의 일례를 나타낸 것이다. FWD시험에 의한 표면처짐곡선과 수치해석에 의해서 구한 표면처짐곡선이 동일한 경향을 나타내고 있음을 볼 수 있다.

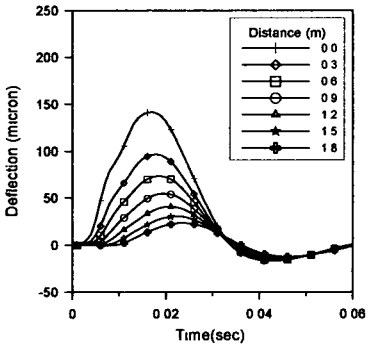

그림 4. 거리별 표면처짐의 변화

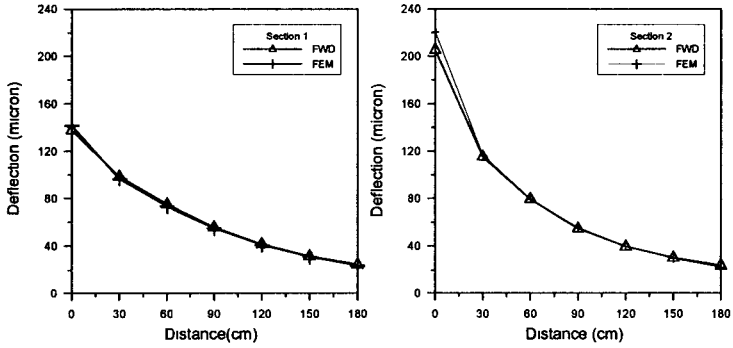

그림 5. FWD 시험과 동적 유한요소해석에 의한 표면처짐곡선

표 3은 FWD시험과 수치해석모델에 의한 표면처짐과 오차를 나타낸 것이다. 가장 큰 오차가 발생한 단면 2는 아스팔트 콘크리트 표면의 온도가 가장 높은 여름인 경우로 하중재하지점에서의 표면처짐을 비교하면, 동적 유한요소해석에 의해서 구한 값이 FWD시험에 의해서 구한 표면처짐보다 7.44% 큰 오차가 나타나는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 해석결과는 아스팔트 콘크리트표층의 온도에 따른 점탄성거동을 정확하게 반영하지 못한 결과라고 판단된다. 그러나, 4개 단면에서 구한 평균 오차는

2.33% 정도로 매우 적음을 알 수 있다. 이와 같이 FWD 현장시험과 수치해석모델에 의한 표면처짐을 살펴본 결과 본 연구에서 사용한 FWD 시험의 수치해석모델이 타당하다고 사료된다.

표 3. FWD 시험과 동적 유한요소해석에 의한 표면처짐의 오차

단면 / 표면처짐	1			2			3			4		
	FWD (micron)	FEM (micron)	오차 (%)	FWD (micron)	FEM (micron)	오차 (%)	FWD (micron)	FEM (micron)	오차 (%)	FWD (micron)	FEM (micron)	오차 (%)
W_1	137.61	141.52	-2.84	205.36	220.63	-7.44	107.45	112.70	-4.89	92.40	95.19	-3.02
W_2	98.5	96.51	2.03	115.15	116.40	-1.09	81.39	81.86	0.58	75.00	73.78	1.63
W_3	75.10	73.35	2.33	79.22	79.52	-0.38	64.2	64.15	0.12	61.38	59.87	2.46
W_4	55.71	54.67	1.87	54.48	55.38	-1.66	49.50	50.02	-1.04	48.81	47.60	2.49
W_5	41.38	40.73	1.58	39.27	39.65	-0.96	38.28	38.87	-1.55	38.47	37.48	2.56
W_6	31.29	30.65	2.03	29.82	29.23	1.99	29.51	30.23	-2.45	30.05	29.46	1.90
W_7	24.53	23.57	3.93	23.69	22.28	5.93	23.07	22.64	-2.45	23.79	23.27	2.17

6. 참고문헌

1. 최준성, 김수일, "아스팔트 콘크리트 포장구조체의 현장온도 조건을 고려한 의사정적 역해석기법에 관한 연구", 대한토목학회 논문집 19권 제 3-6호, 대한토목학회, 1999.11.pp. 1081 -1092
2. Kuhlemeyer, R. L. and Lysmer,J., "Finite Element Method Accuracy for Wave Propagation Ploblems", Journal of Soil Mechanics and Foundatoins Division, ASCE, No.SM5, 1973, pp. 421-427
3. Roesset, J. M., Stokoe II, K. H. and Chia-ray Seng, "Determination of Depth to Bedrock from Falling Weight Deflectometer Test Data", *TRR 1504*, TRB, Washington D. C., 1995, pp. 68-78.