

연약지반의 압밀침하에 의한 도로포장설계의 영향분석

An Analytical Study on the Effect of the Consolidation Settlement in the Soft Ground for the Pavement Design

최준성*

Choi, Jun Seong*

1. 서 론

일반도로포장설계시 도로포장설계는 미국의 AASHTO 설계법을 준용하여 건교부설계지침에 따라 설계하며, 일반적으로 지반분야, 특히 연약층의 지반해석은 지반설계분야에서 실시되고 있다. 따라서 도로포장설계시 지반설계에서의 허용오차가 도로포장설계에 미치는 영향은 고려되지 못하는 실정이다.

포장도로를 연약지반위에 건설하게 되면, 압밀침하에 의하여 포장노면이 조기에 파괴될 수 있으므로, 파손을 방지하기 위하여 연약지반의 압밀침하 검토와 대책공법을 적용한다. 또한 시공중에도 침하량을 실측하여 소요압밀침하가 완료된 포장이능시기를 결정하는 침하안정관리를 수행한다. 그러나 지반설계에서는 공사비 및 공사기간을 감안하여 소요압밀침하 및 소요 압밀도에 대하여 허용침하량 기준을 적용하고 있어, 허용침하량이 도로포장단면에 미치는 영향을 반드시 검토하여야 소기의 목적을 달성할 수 있다. 하지만 지반설계와 도로포장설계를 각각 나누어 설계하기 때문에 이를 검토하지 못하고 있다.

2. 실제 도로설계자료의 해석적 검토 및 연약지반의 압밀침하 영향분석

2.1 도로포장단면설계의 타당성 검토

본 도로포장단면설계의 타당성 검토는 경험적 설계법인 AASHTO 설계법으로 설계한 아스팔트 콘크리트 포장구조가 차로당 누적통과 교통량을 공용기간동안 운행이 가능한지를 포장구조체 거동해석으로 검토하기 위한 것으로, 설계자료분석, 다층탄성이론에 의한 포장의 구조해석을 통한 거동분석과 공용성수명평가로 이루어지며, 구조적 평가를 위한 포장체 각 층의 물성은 포장구조설계와 정성적으로 비교하기 위하여 설계자료에 쓰인 상대강도계수로부터 추정하였다. 또한 다층탄성이론을 이용한 아스팔트 콘크리트 포장체 해석 프로그램인 KENLAYER 를 이용하여 구조해석을 실시하고 이를 기존연구 발표된 소성변형 및 피로균열의 파괴기준에 근거하여 공용성수명을 예측함으로써 도로포장단면 설계의 설계적정성 및 타당성을 평가하게 된다. 본 연구를 위하여 각각 다른 조건에 적용되는 소성변형 및 피로균열의 파괴기준식을 수집, 분석한 후 도로조건에 적합한 파괴기준식들을 선정하여 사용하였다.

2.1.2 설계단면에 따른 포장구조 해석모델

본 연구에서는 설계단면에 따른 8.2 ton 단축하중에 대한 포장구조단면의 거동을 산정하여 역학적으로 차로당 누적통과 설계교통량과 공용성수명을 비교분석하는 것으로, 설계단면은 표 1.에서와 같이 AASHTO 설계법으로 설계단면을 설계하였기 때문에 설계시 사용된 AASHTO에서 제시하는 상대강도계수 도표를 이용하여 설계에서 이용한 탄성계수를 추정하여 해석하였다. 설계시 20년후의 표층의 탄성계수는 설계에서와 같이 공용성저하(15%)를 고려하여 적용하였고, 포장구조단면 해석시 다층탄성이론을 이용한, 사용자편의환경으로 구축되어 있는 KENLAYER를 사용하였다.

* 정희원, 인덕대학 건설환경설계전공 조교수 · 공학박사 · 02-950-7565(E-mail:soilpave@induk.ac.kr)



표 1. 설계 해석단면 및 설계 상대강도계수 및 해석물성

구 성	상대강도계수	10년 설계단면	20년 설계단면	탄성계수 (kgf/cm ²)		포아송비	비고 - 노상은 동상방지층의 합성지지력을 사용하여 합성 설계CBR 13.31을 고려
덧씌우기층	0.157		5	26,400		0.3	
표층	0.157	5	5	26,400	22,440	0.3	
중간층	0.145	7	7	22,500		0.3	
기층	0.110	14	14	22,000		0.3	
보조기층	0.051	23	23	2,300		0.35	
동상방지층	100CBR	26	26	1,331		0.35	
노상							

2.12 해석결과 및 공용성수명 평가

본 연구에서는 표 1.의 설계에서의 8.2 ton 누적통과교통량을 기존의 파괴기준식으로부터의 공용성수명과 비교하여 포장구조단면설계의 타당성을 검증하고자 설계단면의 포장구조해석을 통해 인장변형율과 연직변형율을 산정하였고, 해석결과를 이용하여 공용성수명을 산정하고 그 타당성을 평가하였다. 공용성수명평가는 허용변형율에 대한 파괴기준식과 현장시험을 실시한 결과를 기초로 한 파괴기준식에 근거하여 수행하였다. 정리된 파괴기준식들로부터 포장구조해석결과 얻어진 인장변형율과 연직변형율로부터 공용성수명을 산정한 결과, 각 기준에 적용된 공용성수명은 표 2.에서와 같이 HMA 설계기준을 제외하고는 누적통과교통량보다 훨씬 큰 공용성수명을 보여주고 있음을 알 수 있다.

표 2. 현장시험결과를 토대로 한 파괴기준식을 통한 공용성수명 산정(보조기층두께 23cm)

Fatigue criterion	10년	20년	Fatigue criterion	10년	20년
Shell (SHELL 설계법)	2.439E+09	5.254E+09	HMA	1.098E+06	2.439E+06
Asphalt Institute (AI 설계법)	7.454E+07	1.711E+08	EVERPAVE	4.107E+08	9.710E+08
Kenis	1.779E+09	4.082E+09	Chevron	4.107E+08	9.710E+08
RII	1.162E+07	3.787E+07	설계교통량	1.0847E07	2.4511E07

2.2 도로설계 영향분석을 위한 연약지반해석

지반설계후 실시되고 있는 현장에서의 침하안정판리는 지반설계에서 충분한 압밀침하에 대한 검토를 수행하였다 하더라도 조사설계에서 예측하지 못한 기초지반의 지층 및 각 지층의 토질정수결정의 오차로 인하여 이론적 예측침하량과 실제 침하의 차이가 발생할 수 있다는 가정하에 실시되는 것이다. 따라서 현장 침하안정판리에서는 성토후 압밀침하량을 실측하고 그 실측치를 분석하여 설계값과의 비교 및 잔류침하량을 확인하여 잔류침하량이 허용치내에 있는 시기를 결정하여 포장공사를 수행하게 된다. 따라서 현장 침하안정판리에서도 잔류침하량이 허용치내에 들어올 경우 일반적으로 도로포장설계에 따라 공사를 수행하므로 완공이후 도로포장단면에서 공용중에 나타나는 영향은 검토를 못하고 있는 실정인 것이다.

본 연구에서는 연약층 지반위에 놓이는 포장체의 지반영향을 검토하기 위하여 유한요소해석을 통한 변위 해석을 목적으로, 지반에서의 유한요소해석(FEM : Finite Element Method)을 적용하여 현장여건에 맞는 해석을 수행하기 위하여 탄성해석과 소성해석을 수행하였다.

본 연구에서 제안하고자 하는 변위해석을 위한 유한요소해석과정은 다음과 같다. 먼저 포장체가 놓이게 되는 지역의 연약층등을 포함한 지반의 현재 상태를 평가한 기존의 보링자료에 근거하여 지반의 물성치들을 추정하고, 지반해석에 많이 사용되고 있는 PLAXIS 유한요소해석 프로그램을 통하여 연약층에서 발생하는 지반설계에서 허용되는 잔류침하 상태하에서의 포장체의 영향을 검토한다. 이와같은 해석결과를 토대로 추후



잔류침하 발생시 발생할 수 있는 파손을 규명하여 이를 제어하기 위한 설계단면을 제시한다.

2.2.1 포장체와 지반단면의 특성평가

유한요소해석을 위한 지반의 평가에 대한 토성자료는 도로 설계지역의 보링자료를 이용하여 해석 물성치를 결정하였다. 유한요소해석에서 사용된 포장체와 지반 입력물성은 표 3.과 표 4.에 나타내었다.

표 3. 포장체 단면의 입력물성

구분	γ_{dry} (kN/m ³)	γ_{wet} (kN/m ³)	E (kN/m ²)	ν	c (kN/m ²)	ϕ (deg)	k (m/day)
아스팔트층	22.8	24.0	2288700	0.3	-	-	1
보조기층	21.2	23.0	230000	0.35	-	-	10
노상	18.85	21.2	133100	0.4	70	35	0.006

표 4. 지반단면의 입력물성

구분	γ_{dry} (kN/m ³)	γ_{wet} (kN/m ³)	E (kN/m ²)	ν	c (kN/m ²)	ϕ (deg)	k (m/day)
성토부(노체)	17.0	19.0	30000	0.35	30	30	0.006
연약지반(압밀층)	14.9	18.0	2500	0.35	41	0	0.00000026
풍화토층	17.5	18.5	70000	0.33	20	30	0.006

2.2.2 연약지반상의 압밀해석에 의한 잔류침하량 산정

본 연구의 해석단면은 그림 1.과 같은 최대심도의 연약층으로 구성된 지층으로, 표 5.와 같이 압밀해석으로 잔류침하량을 산정하여 지반처리에서의 안정성 평가를 수행한 지역이다. 본 연구의 해석단면을 살펴보면 1+800 단면 구간은 양측 구간은 교량구간으로, 교량도로의 경우 말뚝기초로 침하가 발생하지 않으므로 교량 연결도로의 경우 부등침하량이 잔류침하량 5.51cm 로 발생함을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이와같이 발생한 부등잔류침하량을 변위하중으로 모사화하여 도로에 미치는 영향을 살펴보고자 한다.

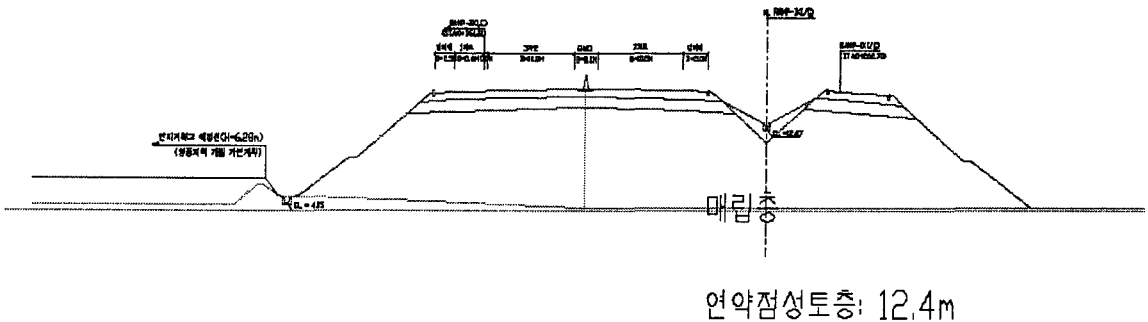


그림 1. 해석지층



표 5. 해석단면의 압밀해석

구 분		1+240	1+800	2+140
총침하량 (cm)		126.72	154.44	151.35
방치종료 후	기간 (일)	402	360	290
	U (%)	96.0	96.4	95.5
	침하량	122.61	148.93	144.49
잔류침하량(cm)		4.11	5.51	6.86
판 정		O.K	O.K	O.K

(주) 기간은 성토 시점에서 성토 종료 후의 입밀도 및 침하량, 성토속도가 5cm/일 이며, 성토 종료와 동시에 허용잔류 침하량에 들어옴

2.3 지반해석에 의한 전체도로영향 해석결과

2.3.1 해석단면과 압밀침하량의 변위하중에 대한 모델링

2차원 유한요소해석에서는 평면변형조건을 가정하여 해석단면의 수직방향의 변형이 없는 중앙부의 단면에 대하여 해석을 실시하는 것이 일반적이다. 따라서, 본 연구에서의 유한요소해석을 위하여 포장체와 지반 단면에 대한 유한요소망을 구축하였다. 해석의 정확성을 기하기 위하여 유한요소해석프로그램인 PLAXIS에서 가능한 최소의 크기로 조밀하게 유한요소망을 구성하였다.

본 해석의 대상이 되는 1+800 단면에서 인접한 좌우구간의 부등침하량은 최대 5.51cm 이므로 부등침하량만큼의 변위를 압밀층 상단에 가하고, 교통하중의 추가적인 영향을 살펴보기 위하여 차량하중을 모사화한 후 그림 2.와 같이 유한요소망을 구성하였다. 해석을 수행하기 전 지하수위에 따른 수압의 영향과 각 층의 자중에 의한 토압의 영향을 분석하여야 한다. 따라서 지하수위는 안전측 해석을 위하여 최대 만수위인 노상상단에 위치시켰으며, 각 층의 자중에 의한 토압을 고려하였다.

2.3.2. 결과 및 분석

유한요소해석결과는 부등침하량과 차량하중에 의한 변위와 변형율이며, 해석결과 좌측부의 압밀층 상단 부등침하량과 중앙부 차량하중에 의한 변형은 우측으로 갈수록 변형이 줄어들음을 알 수 있었다. 해석결과 일레로 그림 3.에 보이는 바와 같이 변위벡터의 밀도의 경우 압밀층 상단부가 표면에 비하여 높은 것을 알 수 있으며 이는 부등침하에 의한 영향이 차량하중에 의한 영향에 비하여 높은 것을 알 수 있었다. 또한 포장구조체 전체의 공용성에 직접적인 영향을 미치는 변형을 역시 변형율 벡터의 밀도의 경우 압밀층 상단이 높은 것을 알 수 있었다. 전체 해석층의 과잉간극수압의 경우, 압밀층의 투수계수가 매우 작으므로 부등침하량과 차량하중에 의한 과잉간극수압은 압밀층에 높게 분포됨을 알 수 있었다.

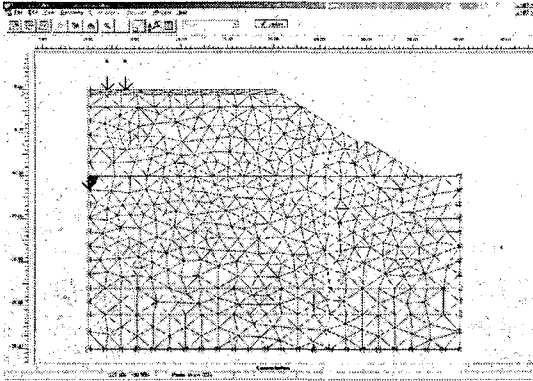


그림 2. 유한요소망의 구성

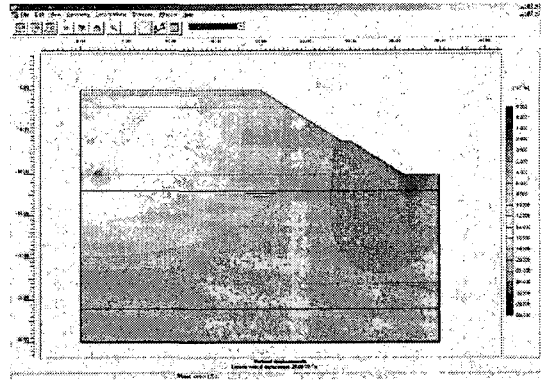


그림 3. 수직방향 변위 등고선

3. 본 연구의 지반해석을 감안한 도로설계

3.1 압밀침하해석에 의한 도로해석

본 연구에서는 지반의 허용잔류침하량으로 인한 도로포장단면에 대한 영향을 공사비와 공사기간등을 감안하여 대안설계 방법으로, 보조기층 두께를 변화시켜가면서 해석을 실시하였다. 그림 4는 보조기층의 두께가 변화함에 따른 지반유한요소해석으로부터 포장구조체의 소성변형을 나타내는 도로표면 최대변위 및 장기 공용성에 영향을 미치는 아스팔트층 하단의 인장변형률과 노상상단의 연직변형률의 변화이다. 본 연구의 해석결과, 보조기층의 두께가 28cm 일 때 소성변형에 문제가 야기되는 0.5인치(12.7mm)에 약간 못 미치는 결과를 나타내고 있어 보조기층 두께가 최소 28cm부터 부동침하량에 따른 변위가 소성변형에 대하여 문제가 없음을 알 수 있다.

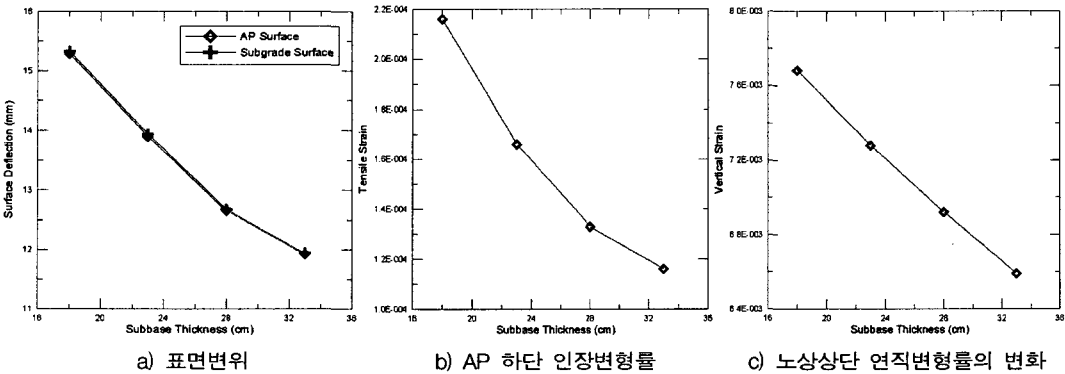


그림 4. 보조기층 두께변화에 따른 해석결과

3.2 지반해석을 결과를 토대로 제시된 포장구조단면설계의 공용성분석

본 연구에서는 기존 도로포장두께설계를 지반해석 결과를 토대로 보조기층 두께를 28cm로 설계변경을 제시하였다. 따라서 제시된 포장구조단면설계의 타당성을 검증하고자 설계단면의 포장구조해석을 통해 인장변형률과 연직변형률을 산정하였다.

표 2의 공용성 분석과정을 통해 수행한 결과, 표 6과 같이 각 기준에 적용된 공용성수명은 누적통과교



통량보다 훨씬 큰 공용성수명을 보여주고 있음을 알 수 있다. 또한 보조기층 28cm 로 제시된 본 연구의 두께설계는 표 2.에서와 같이 HMA 설계식과의 비교시 약간 작은 공용성수명을 보여준 기존 두께설계의 제한성을 극복함을 알 수 있다.

표 6. 현장시험결과를 토대로 한 파괴기준식을 통한 공용성수명 산정
(보조기층 설계변경두께 28cm)

Fatigue criterion	10년	20년
Shell (SHELL 설계법)	3.395E+ 09	3.395E+ 09
Asphalt Institute(AI 설계법)	7.646E+ 07	1.791E+ 08
Kenis	1.824E+ 09	4.274E+ 09
RII	1.205E+ 07	4.043E+ 07
HMA	1.125E+ 06	2.549E+ 06
EVERPAVE	5.951E+ 08	1.371E+ 09
Chevron	5.951E+ 08	1.371E+ 09
설계교통량	1.0847E07	2.4511E07

4. 결 론

본 연구에서는 연약층 지반위에 놓이는 포장체의 지반영향을 검토하기 위하여 유한요소해석을 통한 변위 해석을 수행하여 지반에서 설계되는 지반설계가 포장체에 미치는 영향을 도로포장단면설계에 적용시킬 수 있는 방안을 제시하였다. 제시된 해석방법의 복합해석을 위해 본 연구에서는 연약지반상의 잔류침하량에 의해 포장체에 미치는 영향을 분석하고자 유한요소해석 프로그램인 PLAXIS를 이용한 변위해석을 실시하였고, 유한요소 해석시 기초지반의 거동을 탄성, 소성해석으로 동시에 해석하였다.

본 연구에서 제안된 방법을 적용하여 실제 지반설계에서 발생하는 허용오차에 대한 영향을 해석적으로 검토하고, 이를 실제 연약지반 도로설계에 적용하여 본 연구에서 제시된 해석적 방법에 대한 타당성을 실제 사례지역의 해석으로부터 검증하였다.

참 고 문 헌

1. 건설교통부, 도로설계편람, 건설교통부, 2000
2. Huang, Y. H., Pavement Analysis and Design, Prentice-Hall Inc., 1993
3. 김현태, "표충고결된 연약지반위에 포장도로의 침하안정관리 사례", 대한토목학회 학회지 2002.5 pp 40-44,
4. 위국련, 최준성, 토질역학, 2002
5. R.B.J, Brinkgreve, P.A. Vermeer., "PLAXIS-finite element code for soil and rock analyses", Brookfield, 1998
6. 서주원, 최준성, 김수일, "사용자 편의환경을 이용한 다층탄성 프로그램의 개발.", 한국도로포장공학회 학술 발표회 논문집, pp 69-77., 2003.
7. 최준성, 서주원, 김수일, "온도 및 응력 비선형성을 고려한 아스팔트 포장구조해석모형개발", 한국도로학회 학술발표회 논문집 pp 75-82., 2004.