

콘크리트 포장에서 하부구성층 강성의 변화에 따른 복합 K의 변화

Variation of Composite K with Change of Stiffness in Sublayers under PCC Pavement

임유진* · 이성준** · 임광수*** · 조윤호**** · 조호진***** · 박재학*****

Lim, Yu Jin · Lee, Sung Jun · Lim, Kwang Soo · Jo, Yun Ho · Jo, Ho Jin · Park, Jae Hak

1. 서 론

현재 콘크리트 포장하부지지력 감소 원인은 기층 또는 보조기층(콘크리트 포장슬래브가 이들 층의 직상단에 포설되었을 경우에 한함)의 유실(erosion)에 의한 것으로 판단된다. 이러한 유실은 포장의 피로파괴 발생의 단초를 제공하며 상부포장 슬래브의 균열이 확장되는 원인이 된다. 따라서 재료의 유실특성에 대한 시험을 바탕으로 하여 콘크리트 포장에 적용할 수 있는 누적손상개념의 새로운 구조해석방법이 개발될 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 이와 같은 구조해석방법 및 시험법의 개발에 앞서 콘크리트 포장하부 지지력 감소모델의 개발방향을 제시하고자 하였으며 이를 위하여 국내외 도로에서 실시된 LTPP 데이터를 활용하여 콘크리트 포장에서 지반지지력계수의 감소경향을 분석하였다. 측정대상 LTPP 데이터는 콘크리트 포장에 대한 FWD 시험데이터에 국한하였다.

2. 콘크리트 포장단면구성에 따른 복합 K 변화값

2.1 복합 K 산정모형식

한국형포장설계법에서는 콘크리트 포장의 설계 입력물성치로서 복합 K를 사용한다(한국건설기술연구원, 2004). 한국형포장설계법에서 사용하는 복합 K값 산정식은 국내의 대표적인 포장지구조 단면구성을 설정하고 환산 차륜하중하의 처짐량을 유한요소해석 및 다층탄성해석 프로그램을 이용하여 구하고 이를 바탕으로 회귀분석하여 결정된 바 있다(임유진 등, 2007). 결정된 복합 K산정식은 각 포장단면별로 식 (1) ~ 식 (3)과 같으며 별도로 노상 깊이와 절토부에 대한 고려를 할 수 있는 식이 제안되었다.

모형식 I : 노상 + 입상 보조기층 구성 단면

$$\begin{aligned} \text{LogK} = & 1.983 + 0.615 \log(M_R) - 1.09 \log(D_{SG}) + 0.855 [\log(E_{SB}) \times \log(t_{SB})] \\ & + 0.324 [\log(M_R) \times \log(D_{SG})] - 0.301 \log(E_{SB}) - 1.23 \log(t_{SB}) \\ & - 0.587 [\log(M_R) \times \log(t_{SB})] - 0.113 [\log(D_{SG}) \times \log(E_{SB})] \quad (R^2 = 0.959) \end{aligned} \quad (1)$$

* 정회원 · 배재대학교 건설환경공학과 부교수 · 공학박사(E-mail : yujin@pcu.co.kr)
 ** 정회원 · 국토해양부 간선도로과 과장 · 공학박사 (E-mail : sungjlee@mltm.go.kr)
 *** 정회원 · 국토해양부 간선도로과 서기관 · 공학석사(E-mail : lim579@mltm.go.kr)
 **** 정회원 · 중앙대학교 건설환경공학과 부교수 · 공학박사(E-mail : yhcho@cau.ac.kr)
 ***** 비회원 · 배재대학교 건설환경공학과 석사과정(E-mail : tienhue@gmail.com)
 ***** 비회원 · 배재대학교 건설환경공학과 학부과정(E-mail : trans999@naver.com)



모형식 II : 노상 + 린콘크리트 구성 단면

$$\text{Log}K = 2.512 - 0.237[\log(D_{SG})]^2 + 0.451[\log(t_{Lean}) \times \log(E_{Lean}) - 1.54\log(D_{SG})] - 0.487[\log(M_R) \times \log(t_{Lean})] + 0.494[\log(M_R) \times \log(D_{SG})] \quad (R^2 = 0.997) \quad (2)$$

모형식 III : 노상 + 입상 보조기층+ 린콘크리트 구성 단면

$$\text{Log}K = -1.018 + 1.667\log(M_R) - 0.27[\log(t_{Lean}) \times \log(E_{SB})] - 1.386\log(D_{SG}) + 0.358[\log(M_R) \times \log(D_{SG})] + 0.366[\log(t_{SB}) \times \log(E_{SB})] - 9.66 \times 10^{-2}[\log(D_{SG})]^2 - 0.181[\log(M_R)]^2 - 0.379[\log(M_R) \times \log(t_{SB})] + 0.3[\log(t_{Lean}) \times \log(E_{Lean})] \quad (R^2 = 0.971) \quad (3)$$

2.2 포장단면구성에 따른 복합 지지력계수의 최대(K_{max}) 및 최소값(K_{min}) 분석

국내 가용 콘크리트 포장의 구성단면차이와 각 재료의 물성(E)차이에 따른 복합 K의 변화를 먼저 파악하고 이를 근거로 초기 복합 K값의 분포대를 결정하였다. 국내 대표포장단면과 각층의 탄성계수 변화폭을 표 1과 같이 설정하고 식 (1)~식(3)을 이용하여 계산된 각 단면구성에 따른 복합 K의 계산변화를 계산하였다. 이와 같이 계산된 복합 K값은 감소가 시작되기전 시공초기의 각 콘크리트 포장단면에서의 초기 복합 K로 설정되었다. 식 (1)~식 (3)에 의해 계산된 복합 K의 변화폭은 최소값(K_{min}) ~ 최대값(K_{max})으로 나누어 정리하였다.

대표단면은 결정식과 같이 ①노상+보조기층, ②노상+린콘크리트, ③노상+보조기층+린콘크리트로 국한하였으며 각 단면의 두께를 변화시키면서 복합지지력계수의 변화를 조사하였다. 노상의 두께 t = 60, 152, 305(cm), 보조기층의 두께 t = 15, 20, 30(cm) 및 린콘크리트의 두께 t = 10, 15, 20(cm)로 가정하였다. 각 단면 구성별 두께 조합 및 보조기층과 노상의 입력 물성치는 표 1과 같다.

표 1. 대표단면의 구성과 입력 물성치

단면 구성	각 층의 두께		입력 물성치			
보조기층 +노상	보조기층	↑↓ 15~30cm	보조기층		보조기층 탄성계수변화	
	노상	↑↓ 60~305cm	E _{min} (MPa, psi)	E _{max} (MPa, psi)		E _{sub-min}
린콘크리트 +노상	린콘크리트	↑↓ 10~20cm	60, 8702.265	422, 61205.93	60MPa	
	노상	↑↓ 60~305cm	노상		E _{sub-mid}	
린콘크리트 +보조기층 +노상	린콘크리트	↑↓ 10~20cm	E _{min} (MPa, psi)	E _{max} (MPa, psi)	207MPa	
	보조기층	↑↓ 15~30cm	37.83, 5486.778	280, 40610.57	E _{sub-max}	
	노상	↑↓ 60~305cm			422MPa	

3개 대표단면에 대하여 제시된 복합지지력계수 산정식을 이용하여 린콘크리트의 탄성계수를 고정된 상태에서 노상과 보조기층의 탄성계수(E)를 최소값부터 최대값의 영역내에서 변화시킬 때 복합지지력계수(K_∞)의 변화폭을 조사한 결과는 표 2~표 4와 같다.

표 2. 보조기층의 탄성계수가 가장 작은값($E_{SUB-MIN}$)일 경우 복합지지력계수 영역

단면구성	최소값 (K_{min})(MPa/m)	최대값 (K_{max})(MPa/m)
노상+보조기층	59.33	355.97
노상+린콘크리트	154.55	1220.15
노상+보조기층+린콘크리트	144.7	958.43

표 3. 보조기층의 탄성계수가 중간값($E_{SUB-MED}$)일 경우 복합지지력계수 영역

단면구성	최소값 (K_{min})(MPa/m)	최대값 (K_{max})(MPa/m)
노상+보조기층	95.02	439.9
노상+린콘크리트	154.55	1220.15
노상+보조기층+린콘크리트	165.55	1006.4

표 4. 보조기층의 탄성계수가 최대($E_{SUB-MAX}$)일 경우 복합지지력계수 영역

단면구성	최소값 (K_{min})(MPa/m)	최대값 (K_{max})(MPa/m)
노상+보조기층	79.65	582.73
노상+린콘크리트	154.55	1220.15
노상+보조기층+린콘크리트	180.61	1038.92

국내 노상토의 탄성계수 영역에서 가장 복합지지력계수가 작게 산출되는 것은 노상+보조기층의 단면구성인 경우로 확인되었으며 이는 AASHTO '93 설계지침에서 제시한 복합지지력계수와 비슷한 영역으로 확인되었다. 반면 노상+린콘크리트, 노상+보조기층+린콘크리트 단면의 경우에는 복합지지력계수의 최대값이 기존 설계값에 비하여 크게 증가하는 결과를 확인할 수 있었다. 따라서 국내에서 빈번하게 설계되는 노상+보조기층+린콘크리트 구성의 경우 초기 복합 K값이 매우 크고 침식과 유실에 의한 포장하부의 지지력감소가 타 포장구성에 비하여 그리 크게 나타나지 않을 것으로 판단되므로 각 포장구성별로 지지력 감소모델의 설정이 별도로 제시되어야 하나 본 연구에서는 노상+보조기층 및 노상+기층의 구성에 국한하여 포장지지력 감소모델의 개발을 추진하였다.

3. 복합 K 저하모델

콘크리트 포장하부의 지지력감소 모델은 복합 K 저하 모델을 이용하여 개발하게 된다. 이는 현 한국형포장설계법에서 개발중인 콘크리트 포장설계법의 기본 입력값이 복합K가 사용되기 때문이며 이를 위하여 아래와 같이 복합 K 저하모델 개발을 위한 기본 가정을 설정하였다.

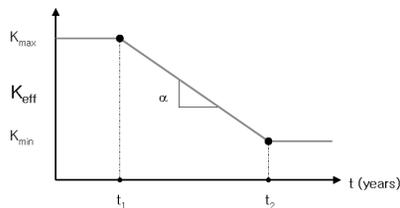


그림 1. 복합 K 저하 함수

3.1 복합 K 저하모델의 기본 가정

복합 K저하모델의 기본 가정은 다음과 같다.

- ① 복합 K값은 최대값(K_{max}) 및 최소값(K_{min})이 존재하며 공용초기 일정시점(t_1)까지 최대값(K_{max})을 유지하며 임의공용시간(t_2)이후에는 최소값(K_{min})유지



② 복합 K값은 초기 공용후 일정시점(t1)부터 저하가 발생하기 시작하며 복합 K값의 저하율(α)은 일정 공용시점(t2)까지 균등한 값을 유지

③ 복합 K값의 초기값은 최대값(K_{max})으로 간주

3.2 복합 K저하모델의 사용제한

복합 K저하모델의 사용에 있어서 제한성은 다음과 같이 규정하였다.

- ① 복합 K저하모델은 하부층의 구성에 따라 감소율(α) 및 감소시점(t1)과 감소종점(t2)을 각각 달리 적용
- ② 하부층의 구성은 기본 복합K산정모델에서와 같이 3가지 대표단면으로 국한

3.3 국외 사례를 이용한 복합K 저하모델 감소율(α) 조사

미국의 LTPP(www.ltp-products.com) 자료중 비교적 데이터가 충실한 Kansas주, Iowa주 및 Minnesota 주의 콘크리트 포장관련 데이터중 JCP포장에 국한하여 관련자료를 추출하였다. 각주의 검색된 포장단면중 대표단면을 분류하고 해당단면에서 주기적으로 실시된 FWD시험 값을 취합한 후 이를 AREA 방법을 이용하여 지반지지력계수를 역산하여 구하였다. 따라서 해당도로의 공용후 시간경과에 따른 복합 K의 감소율을 추정할 수 있었다. FWD 데이터를 이용하여 지지력계수를 구하는데 사용한 AREA식은 다음과 같다.

$$AREA = 6 \left[1 + 2 \left(\frac{d_{12}}{d_0} \right) + 2 \left(\frac{d_{14}}{d_0} \right) + \left(\frac{d_{36}}{d_0} \right) \right] \quad (4)$$

여기서, d_0 = 재하판에서의 변형량,

$d(xx)$ = xx 거리에 있는 센서의 변형량. 예) d_{12} 는 재하판에서 12inch에 위치한 센서의 변형량.

그림 2.는 해석 대상 LTPP 데이터중 Iowa주에서 획득한 FWD 시험데이터를 AREA방법에 의하여 역산하여 분석한 결과로서 포장단면의 구성차이를 구별하지 않고 복합 K의 감소경향을 도시한 것이다. 이에 의하면 복합 k의 감소율(α)은 0.2 MPa/m/year 정도로 판단되었다. 미국의 경우 lime 처리된 기층이 빈번하게 사용되므로 복합 K의 감소율이 비처리된 쇄석기층이 있는 국내의 경우에 비하여 작은 것으로 판단된다.

반면 국내 콘크리트 포장에서는 린콘크리트층이 사용되므로 미국의 경우와 유사한 감소율을 보일 수도 있을 것으로 판단된다. 표 5는 포장 단면을 달리하였을 때 데이터가 충실한 일부 개소에서의 감소율 변화를 정리하여 도시한 것이다. 보조기층이 있는 경우가 없는 경우에 비하여 감소율이 상당히 작게 나타남을 알 수 있다. 즉, 표 5~표 6에서 노상+기층+포장의 단면에서는 감소율이 1.15~3.22(MPa/m/year)로 나타났고 노상+보조기층+기층+포장의 감소율은 0.18~0.4(MPa/m/year)이었다. 이것은 보조기층의 유무에 따라 복합 K의 값이 6.5~8.3% 정도의 증감차이를 보이며 아울러 보조기층의 시공을 통해 해당 콘크리트 포장의 복합 지지력계수 감소율을 줄일 수 있는 것으로 조사되었다.

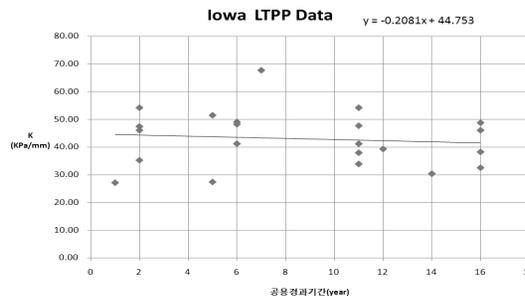


그림 2. Iowa주에서의 FWD 역산에 의한 복합 K 변화추세

표 5. Iowa의 대표단면 및 LTPP data

장소	대표단면	지역별 LTPP
Iowa 3009 지역	Original Surface Layer (Layer TY: PC)	
	27cm	
	Base Layer (Layer TY: TB)	
	11.7cm	
Subbase (Layer TY: GS)	14cm	
Subgrade (Layer TY:SS)	cm	
Iowa 3006 지역	Original Surface Layer (Layer TY:PC)	
	23cm	
	Base Layer (Layer TY:TB)	
	11cm	
Subbase (Layer TY:SS)	cm	
Layer TY PC: Portland Cement Concrete TB: Cement Aggregate Mixture SS: Fine-Grained Soil : Sand Lean Clay GS: Coarse-Grained Soil : Silty Sand		

표 6. Iowa주 외의 지역의 감소율

해당지역(지역고유번호)	포장 구성	감소율(MPa/m/year)
Georgia주 (3011.3020)	노상+기층+포장	2.77
	노상+보조기층+기층+포장	0.23
Wisconsin주 (3014.6351)	노상+기층+포장	3.22
	노상+보조기층+기층+포장	0.18
Nebraska주 (3028.3033)	노상+기층+포장	1.15
	노상+보조기층+기층+포장	0.4

3.4 국내 ○○공항 지지력계수를 이용한 감소율 예시

2002년부터 2007년까지 ○○공항에서 측정된 FWD 데이터를 이용하여 획득된 복합지지력계수로부터 복합 K값의 감소율을 추적, 조사하였다. 그림 3은 공항내 활주로부분의 콘크리트 포장 전구간에 걸친 데이터를 이용하여 공용년수에 따른 복합지지력계수의 감소율을 도시한 것으로서 평균 감소율은 약 5.2 MPa/m/year이었다. 이는 청주공항내 각 개소에서 획득된 독립데이터를 이용하여 복합지지력계수를 획득하고 정리한 것으로서 포장공용 상태에 따라 복합지지력계수의 감소율이 다름을 알 수 있다. 각 개소별 복합지지력계수의 감소율은 약 1.1~8.63로 나타났다(표 7참조).

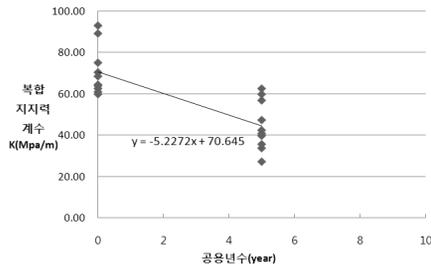


그림 3. 전구간

표 7. 각 지점의 감소율과 신뢰도

	감소율(α) (단위 : MPa/m)	결정계수(R^2)
구활주로 남측 직각유도로	-7.8163	0.7954
구활주로 중앙부	-1.1037	0.2456
구활주로 북측 직각유도로	-8.63	1
신활주로 06방향 말단부	-5.627	0.8896
전구간	-5.2272	0.5798

4. 결 론

포장구조체는 공용 후 시간이 경과함에 따라 다양한 환경변화를 겪게 되고 이로 인하여 지지층의 지지력 감소가 발생하는 경우가 많다. 본 연구에서는 콘크리트 포장 하부층의 지지력감소원인인 유실에 의한 콘크리트 포장하부 지지력 감소모델의 개발방향을 제시하고자 하였다. 이를 위하여 국내외 도로에서 실시된 LTPP 데이터를 활용하여 콘크리트 포장에서 지반지지력계수의 감소경향을 분석하였다.

감사의 글

본 연구는 “한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구”의 일부로 본 연구를 지원하여준 국토해양부 및 한국건설기술연구원, 한국도로공사에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 임유진, 조윤호, 권기철 (2007) “한국형 포장 설계법에서 콘크리트 포장 설계를 위한 복합 K값 산정 및 현장검증”, 한국도로학회 학술발표회 논문집, pp.185-191
2. 권기철 (2006) “국내 도로포장 하부구조의 기술적특성”, 한국도로학회지, 제8권3호통권29호, pp36~42
3. 남영국 (1997) “최신도로공학 총론”
4. AASHTO (1993), “AASHTO Guide for Design of Pavement Structure,” AASHTO, Washington, D.C.