한국도로학회 논문집
第11券4號 2009年 12月
pp. 95 ~ 105

콘크리트 포장의 공용성 기반 지불규정 적용을 위한 콘크리트 휨강도 및 표면 평탄성에 관한 분석

Analysis of Concrete Flexural Strength and Surface Smoothness for Concrete Pavement Performance Based Payment Regulations

황 성 재 Hwang, Seong Jae | 비회원 · 경희대학교 대학원 토목공학과 석사과정
김 성 민 Kim, Seong-Min | 정회원 · 경희대학교 공과대학 토목공학과 부교수 · 교신저자 (E-mail : seongmin@khu.ac.kr)
이 석 근 Rhee, Suk Keun | 정회원 · 경희대학교 공과대학 토목공학과 교수

ABSTRACT

This study was conducted to investigate the effects of concrete flexural strength and surface smoothness, which were pay factors of concrete pavements, on pavement performance, and to develop the methodologies to determine the proper allowable ranges according to the magnitudes of those pay factors. The concrete flexural strength was analyzed using the AASHTO, power, and linear fatigue failure models, and the surface smoothness was analyzed for the roughness indices of PSI, IRI, and PrI using the AASHTO model. The analysis results showed that the allowable range of the flexural strength should be determined using the rate between the deficiency and strength, and the penalty should be linearly proportional to the strength deficiency rate because the linear relationship between the strength deficiency rate and the reduction in pavement life was observed. As the initial surface smoothness became better, the smoothness deficiency rate should be larger. The penalty due to the surface smoothness deficiency should also be linearly proportional to the smoothness deficiency rate.

KEYWORDS

concrete pavement, payment regulation, flexural strength, smoothness, performance, fatique failure

요지

본 연구는 콘크리트 포장의 지불규정 인자 중 콘크리트 휨강도와 표면 평탄성이 콘크리트 포장 공용성에 미치는 영향에 대하여 분석하고, 이러한 인자에 대한 지불규정을 적용할 때 인자의 크기에 따른 적절한 허용범위를 결정하는 근거를 마련하기 위하여 수행되었다. 콘크리트의 휨강도에 대하여 AASHTO, 지수형, 선형 피로파손 공식 등의 공용성 모델을 이용하여 분석을 수행하였으며, 콘크리트 포장의 표면 평탄성에 대해서는 PSI, IRI, PrI 등의 평탄성 지수와 AASHTO 피로파손 공식을 사용하여 분석을 수행하였다. 연구결과, 휨강도의 허용 기준은 휨강도 손실률(손실량/휨강도)을 기준으로 하여야 하며, 휨강도 손실률이 증가할수록 설계수명이 선형으로 감소하기 때문에 이에 적절하게 공사비를 차감 지급해야 하는 것을 알 수 있었다. 표면 평탄성은 초기 평탄성이 우수할수록 평탄성 지수의 손실률을 크게 허용해야 하며, 휨강도와 같이 평탄성 지수 손실률과 포장 수명 감소가 선형으로 비례하므로 공사비 차등 적용도 이에 적절하게 하여야 한다는 것을 알 수 있었다.

핵심용어

콘크리트 포장, 지불규정, 휨강도, 평탄성, 공용성, 피로파손

1. 서론

현재 국내의 도로 포장 건설기준 및 시방은 자재 및 시공방법 중심으로 되어 있으며 이러한 시방을 따라 시공된 도로 포장은 단기적으로 성능을 판단할 수 있는 근거가 미비하여 고성능 고내구성이 요구되는 도로 포장의 건설을 확신해 주지 못하는 실정이다. 이러한 이유로 콘크리트 포장에서는 조기

결함이 발생할 위험이 크고 설계 수명에 다다르기 이전에 유지 보수를 위하여 막대한 비용을 낭비하는 경우가 발생하기도 한다. 따라서 선진 외국에서는 지불규정(payment regulation, payment adjustment method)이라는 건설 규정을 시공 방법 중심의 시방에 포함시켜 사용함으로써 도로 포장의 성능향상을 유도하고 있다. 현재 국내에서도 도로 포장 건설 분야에 성능 중심의 건설 기준을 적용하기 위한 과정으로 공용성을 기반으로 하는 지불규정을 개발하는 연구가 진행 중에 있다. 지불규정이란 포장의 공용성을 지배하는 중요 인자에 대하여 설계대로 시공이 되지 않은 경우에 그에 대하여 벌금 또는 보너스를 지급하도록 하는 건설 규정이다(서봉교, 2009). 콘크리트 포장의 공용성을 지배하는 가장 중요한 인자로써 국외의 지불규정에서 일반적으로 다루어지고 있는 인자로는 콘크리트 포장 슬래브 두께, 콘크리트 휨강도 또는 압축강도, 표면 평탄성, 공기량 등을 들 수 있으며, 이 중에서 가장 사용 빈도가 높은 슬래브 두께, 평탄성, 휨강도를 우선적으로 국내의 콘크리트 포장 지불규정 인자로 선정하여 이에 대한 연구를 수행하고 있는 실정이다.

본 연구의 목적은 지불규정 인자 중 콘크리트 휨강도와 표면 평탄성이 콘크리트 포장 공용성에 미치는 영향에 대하여 분석함으로써 이러한 인자가 지불규정 인자로써 중요함을 파악하는데 있다. 또한 이러한 인자에 대한 지불규정을 적용할 때 인자의 범위에 따른 적절한 허용범위를 결정하는 근거를 마련하는데 있다. 우선 콘크리트의 휨강도에 대하여 AASHTO(American Association of State Highway and Transportation Officials) 피로파손 공식(AASHTO,1993), 지수형 피로파손 공식, 선형 피로파손 공식 등 여러 종류의 피로파손 공식을 이용하여 휨강도가 포장의 공용성에 미치는 영향을 분석하였으며, 휨강도의 크기에 따라 동일한 수명 손실률을 야기하는 휨강도의 손실량에 대하여 분석을 수행하였다. 그리고 포장의 표면 평탄성에 대해서도 휨강도의 분석과 유사한 방법을 사용하여 표면 평탄성이 포장의 공용성에 어떠한 영향을 미치는 지를 분석하고, 초기 표면 평탄성의 정도에 따른 지불규정 적용 시 허용범위를 결정하는 기준에 대한 분석을 수행하였다. 본 논문은 이러한 연구내용 및 결과에 대하여 상세히 기술한다.

2. 콘크리트 휨강도 분석

콘크리트 포장에서 콘크리트의 휨강도가 포장 수명에 어떠한 영향을 미치는지를 분석하기 위하여 AASHTO 피로파손 공식, 지수형(power) 피로파손 공식 중에 대표적인 Vesic의 피로파손 공식(Vesic and Saxena, 1969) 그리고 선형(linear) 피로파손 공식 중에 가장 널리 사용되는 Kesler의 피로파손 공식(Kesler, 1953)을 콘크리트 휨강도의 분석에서 사용하였다.

2.1. AASHTO 피로파손 공식에 의한 휨강도 분석

AASHTO 피로파손 공식은 AASHO(American Association of State Highway Officials) road test (Highway Research Board, 1962)의 결과를 바탕으로 개발되었으며 식 (1)과 같다.

$$\log_{10}(W_{18}) = Z_R \times S_0 + 7.35 \times \log_{10}(D+1) - 0.06 + \frac{1og_{10}(\frac{\Delta PSI}{4.5-1.5})}{1+\frac{1.624\times10^7}{(D+1)^{8.46}}} + (4.22 - 0.32 \times P_t) \times \log_{10}(\frac{S_c' \times C_d \times (D^{0.75}-1.132)}{215.63 \times J(D^{0.75} - \frac{18.42}{(E_c/k)^{0.25}})}) \quad (1)$$

여기서, W_{18}은 18 kip 단축하중의 재하 횟수, Z_R은 standard normal deviate, S_0는 교통량과 성능 예측의 복합 표준 오차, D는 인치 단위의 슬래브 두께, ΔPSI는 초기 PSI와 최종 $PSI(P_t)$의 차이, S_c'은 psi 단위의 콘크리트 휨강도(modulus of rupture)이며, J는 하중전달계수, C_d는 배수계수, E_c는 psi 단위의 콘크리트 탄성계수이며, k는 pci 단위의 하부지지력이다. 식 (1)에서 콘크리트의 탄성계수는 일반적으로 콘크리트의 휨강도와 서로 연관되어 있기 때문에 식 (2)에 나타낸 휨강도와 탄성계수의 관계를 이용하여 콘크리트의 탄성계수를 휨강도의 항으로 변환하여 분석을 수행하였다(Mindness et al., 2003).

$$Sc' = \frac{7.5E_c}{33W^{1.5}} \quad (2)$$

여기서, W는 pcf 단위의 콘크리트 단위 중량이며 E_c는 콘크리트의 탄성계수이다. 그림 1은 콘크리트 휨강도와 설계수명과의 관계를 나타낸다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 휨강도가 커질수록 콘크리트 포장의 수명은 지수분포의 형태로 증가하는 것을 알 수 있으며 이는 콘크리트의 휨강도가 설계에 있어서 매우 중요하다는 것을 의미한다.

AASHTO 피로파손 공식을 이용하여 슬래브 휨강도 손실이 포장의 수명에 어떠한 영향을 미치는 지를 분석할 수 있으며 분석 개념을 그림 2에 나타내었다. 우선 설계 휨강도를 공식에 대입하여 이에 해당하는 설계 수명인 설계 하중 재하 횟수를 구한다. 그 후 특정양의 설계 수명 손실을 선택하여 이

에 해당되는 슬래브의 휨강도를 AASHTO 피로파손 공식을 역으로 이용하여 구한다. 이렇게 구한 휨강도와 설계 휨강도의 차이가 지정한 수명 손실에 해당하는 휨강도 손실양이 된다. 따라서 이러한 방식으로 여러 범위의 휨강도 손실과 이에 해당하는 수명 손실과의 관계를 얻을 수 있다.

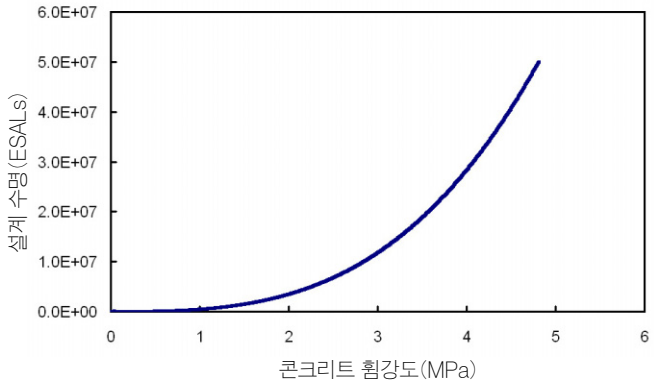


그림 1. 콘크리트 휨강도와 설계 수명의 관계

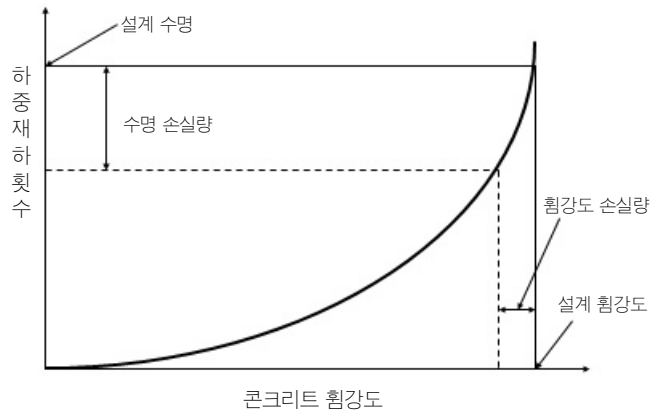


그림 2. AASHTO 공식을 이용한 콘크리트 휨강도 지불규정 개념

콘크리트 휨강도의 지불규정은 휨강도 손실 때문에 생긴 수명 손실양의 설계 수명에 대한 비율을 산정하여 이를 공사비에 적용하던지 아니면 공사비 대신에 생애주기비용을 계산하여 수명 손실 비율을 적용함으로써 개발할 수 있다. 예를 들어 설계 수명인 설계 하중재하횟수가 일백만회인데 이러한 포장에 1MPa의 휨강도 손실이 생겼으며 이에 해당하는 수명 손실이 일십만 하중재하횟수라 하면 1MPa의 휨강도 손실 때문에 10%의 수명 손실이 생겼으며 따라서 이러한 경우에는 공사비의 10%를 삭감하여 지급하던지 아니면 생애주기비용을 계산하여 이의 10%를 삭감하여 지불하는 것이다.

이러한 개념을 이용하여 콘크리트 포장의 설계 휨강도에 따라서 휨강도의 손실 기준이 어떻게 변화해야 하는지를 분석할 수 있다. 예를 들어 설계 수명을 10% 감소시키는 휨강도의 손실량이 콘크리트 휨강도의 크기에 따라 어떠한 차이를 보이는지를 분석하여 그림 3(a)에 나타내었다. 또한 그림 3(b)에서는 휨강도의 손실률, 즉 설계 휨강도의 크기에 대한 휨강도 손실량의 비율이 콘크리트 휨강도의 크기에 따라 어떠한 차이를 보이는지를 분석하여 나타내었다. 그림 3(a)에서 볼 수 있듯이 콘크리트 휨강도가 커질수록 설계 수명을 10% 감소시키는 휨강도의 손실량이 점차 커지는 것을 알 수 있다. 또한 그림 3(b)에서 볼 수 있듯이 휨강도 크기에 대한 설계 수명 10%를 감소시키는 휨강도 손실률은 휨강도의 크기에 거의 관계없이 약 3.5% 정도로 일정한 것을 알 수 있다. 즉, 지불규정을 콘크리트 휨강도에 적용할 때 휨강도가 높은 콘크리트는 휨강도 손실 허용범위를 크게 하고 휨강도가 낮은 콘크리트는 허용범위를 좁게 하여야 한다는 것을 알 수 있다.

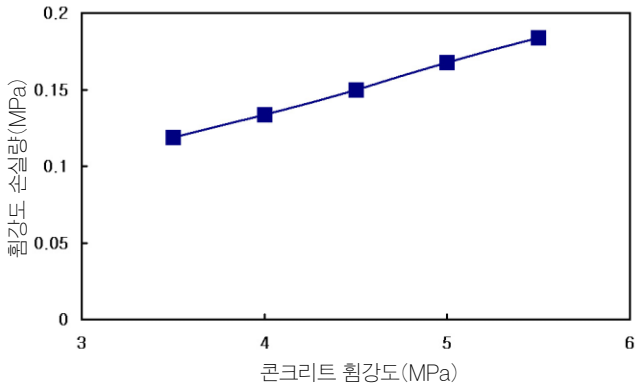


그림 3(a). AASHTO 공식 사용 시 설계 수명 10% 감소에 대한 휨강도와 휨강도 손실량의 관계

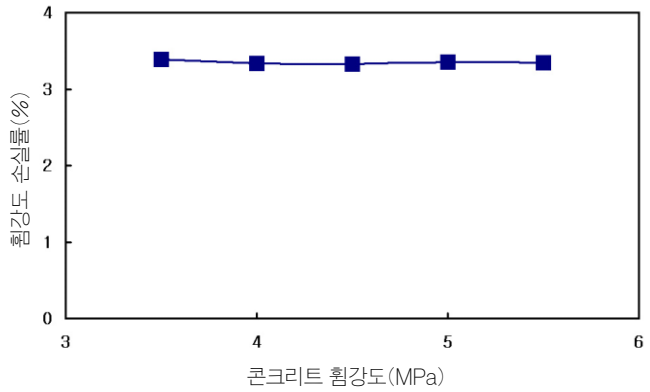


그림 3(b). AASHTO 공식 사용 시 설계 수명 10% 감소에 대한 휨강도와 휨강도 손실률의 관계

초기 설계 휨강도 크기에 따른 포장 설계 수명 손실량과 휨강도 손실량 및 손실률과의 관계에 대해 분석하여 그림 4(a)에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 설계 콘크리트 휨강도의 크기가 클수록 설계 수명 손실에 따른 휨강도 손실량이 커지게 된다. 하지만 그림 4(b)에서 볼 수 있듯이 설계 콘크리트 휨강도 크기에 따른 휨강도 손실률은 휨강도가 다른 값을

가지더라도 거의 같은 값을 가지는 것을 볼 수 있다. 또한 설계 수명 손실과 휨강도 손실률은 거의 선형으로 비례하는 것을 알 수 있다. 즉, 콘크리트 휨강도의 손실률이 커질수록 이에 비례하여 포장 수명의 손실이 커지게 되며 이러한 비율은 휨강도의 크기와는 상관없이 일정하다. 따라서 지불규정에서 콘크리트 휨강도를 고려할 때 휨강도의 손실량을 사용하지 않고 휨강도의 손실률(휨강도 손실량/휨강도)을 사용하여야 한다는 것을 알 수 있다.

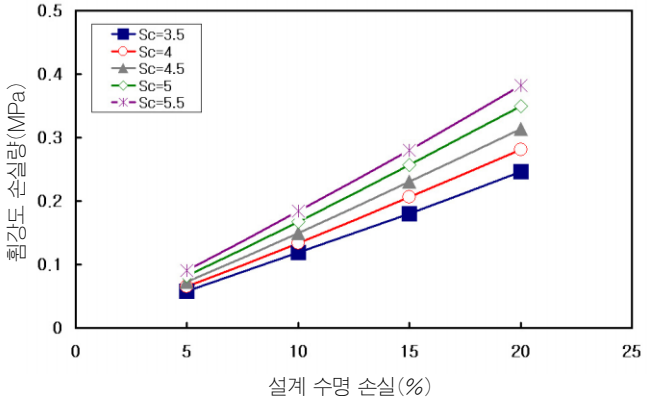


그림 4(a). 콘크리트 휨강도 크기에 따른 설계 수명 손실과 휨강도 손실량의 관계

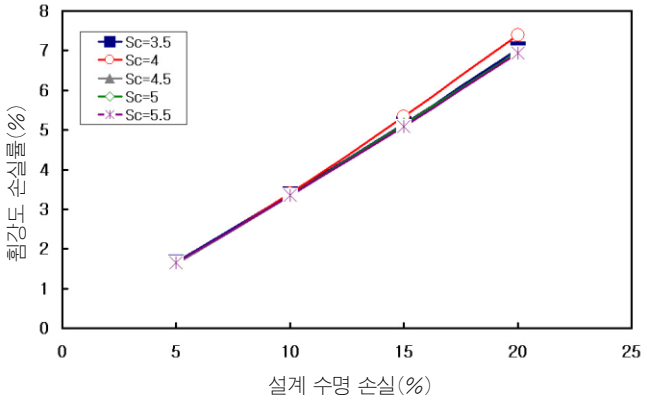


그림 4(b). 콘크리트 휨강도 크기에 따른 설계 수명 손실과 휨강도 손실률의 관계

2.2. 지수형 피로파손 공식에 의한 휨강도 분석

식 (3)은 콘크리트의 피로파손 연구에서 널리 사용되고 있는 지수형 피로파손 공식의 형태이다.

$$N = A(\frac{MR}{\sigma_{max}})^B \quad (3)$$

여기서, N은 반복재하 하중 수, A와 B는 regression coefficients, MR은 modulus of rupture, σ_{max}는 최대 휨응력을 나타낸다. 또한 MR에 대한 σ_{max}의 비를 응력레벨이라 하며 응력과 강도의 비 S로 표기된다. 이 식의 Vesic은 식 (4)와 같이 발전시켰다(Vesic and Saxena, 1969).

$$N = 225{,}000(\frac{1}{S})^4 \quad (4)$$

일반적으로 콘크리트 포장의 응력은 슬래브의 내부, 코너, 단부에서 서로 차이가 생기게 되며 본 연구에서는 슬래브 하부에 큰 인장응력을 야기하는 단부에서의 원형하중에 대한 응력을 기준으로 분석을 수행하였다(Westergaard, 1925). 먼저 슬래브의 휨강도 값이 변화함에 따른 설계 수명의 변화를 그림 5에 나타내었다. 지수형 피로 파손 공식을 사용해도 역시 콘크리트의 휨강도가 커짐에 따라 포장 수명이 지수분포로 증가하게 되며 이는 휨강도가 콘크리트 포장 수명에 큰 영향을 미치는 것을 다시 한 번 보여주는 것이다.

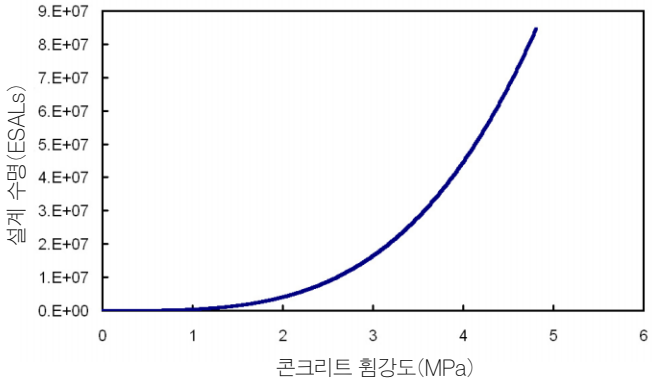


그림 5. 지수형 피로파손 공식에 의한 콘크리트 휨강도와 설계 수명의 관계

지수형 피로파손 공식을 사용하여 휨강도의 손실이 포장 수명에 미치는 영향을 분석하기 위하여 우선 설계 휨강도와 최대응력의 비인 응력레벨을 구한 후 그러한 응력레벨에 해당하는 설계수명을 구한다. 그리고 특정양의 설계수명 손실을 선정하여 이에 해당하는 응력레벨을 피로파손 공식을 역으로 이용하여 구한다. 그리고 응력은 일정하므로 이러한 응력레벨에 해당하는 휨강도를 구한다. 이와 같이 구한 휨강도와 설계 휨강도의 차이가 주어진 설계수명 손실에 대한 휨강도 손실량이 된다.

이와 같은 방법을 이용하여 설계 수명을 10% 감소시키는 휨강도의 손실량이 콘크리트 휨강도의 크기에 따라 어떠한 차이를 보이는지를 분석하여 그림 6(a)에 나타내었으며, 그림 6(b)에서는 휨강도의 손실률(휨강도 손실량/휨강도)이 휨강도의 크기에 따라 어떠한 차이를 보이는 지를 분석하여 나타내었다. 그림 6(a)에서와 같이 설계 슬래브 휨강도가 클수록 설계 수명을 10% 감소시키는 휨강도의 손실량도 점차 커

지고 있는 것을 알 수 있다. 하지만 그림 6(b)에서와 같이 휨강도의 손실률은 약 3% 정도로 일정한 것을 알 수 있다. 이는 AASHTO 피로 파손 공식에서의 분석 결과와 비교하여 수치에서는 다소 차이가 있지만 매우 유사한 결과인 것을 알 수 있다.

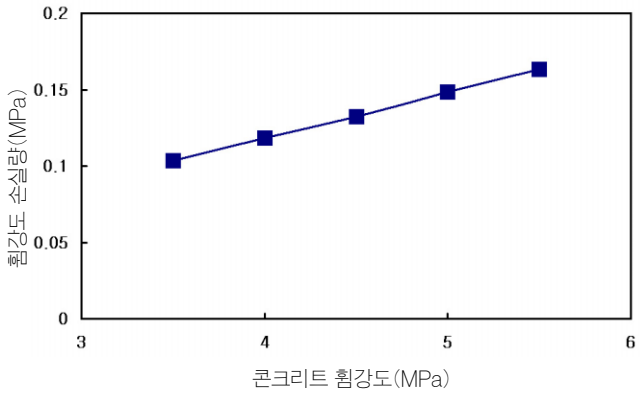


그림 6(a). 지수형 피로파손 공식 사용 시 설계 수명 10% 감소에 대한 휨강도와 휨강도 손실량의 관계

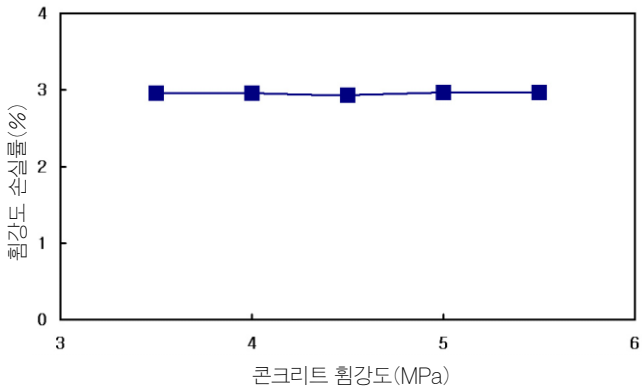


그림 6(b). 지수형 피로파손 공식 사용 시 설계 수명 10% 감소에 대한 휨강도와 휨강도 손실률의 관계

휨강도 크기에 따른 포장 설계 수명 손실량과 휨강도 손실량 및 손실률의 관계에 대한 분석 결과를 그림 7에 나타내었다. 그림에서 보면 알 수 있듯이 지수형 피로파손 공식을 이용하여도 AASHTO 피로파손 공식에서의 분석 결과와 같이 설계수명 손실과 휨강도의 손실은 거의 선형으로 비례하는 것을 알 수 있다.

2.3. 선형 피로파손 공식에 의한 휨강도 분석

선형 피로파손 공식의 일반적인 형태는 식 (5)와 같다.

$$\log(N) = aS + b \tag{5}$$

여기서, N은 하중재하횟수이며 S는 응력레벨, a, b는 상수이다. Kesler는 25GPa의 탄성계수를 가지는 콘크리트에

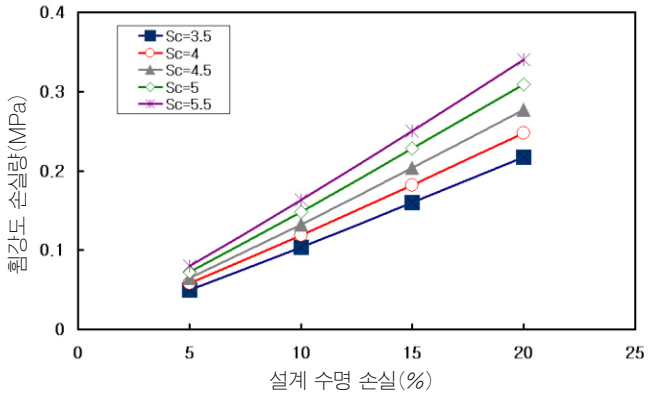


그림 7(a). 지수형 피로파손 공식 사용 시 휨강도 크기에 따른 설계 수명 손실과 휨강도 손실량의 관계

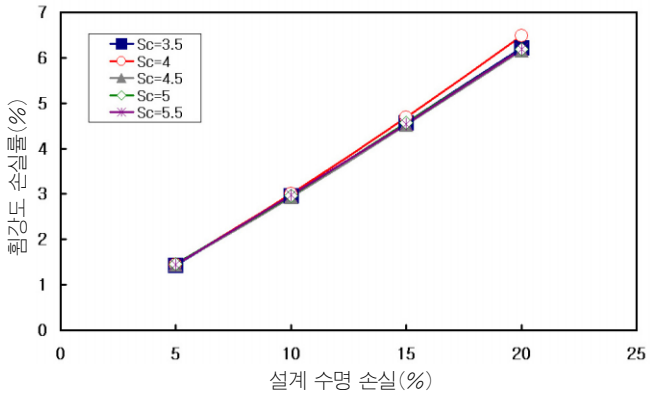


그림 7(b). 지수형 피로파손 공식 사용 시 휨강도 크기에 따른 설계 수명 손실과 휨강도 손실률의 관계

대해서 a를 -20.224, b를 19.292로, 32GPa의 탄성계수를 지닌 콘크리트에 대해서는 a를 -22.07, b를 17.81로 정의하였다(Kesler, 1953). 선형 피로파손 공식 사용 시 휨강도 크기에 대한 설계수명의 변화를 그림 8에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 선형 피로파손 공식에서는 휨강도의 크기가 작을 경우는 설계수명에 거의 영향을 미치지 않으나 휨강도가 어느 정도 커지게 되면 설계수명에 지대한 영향을 미치게 된다.

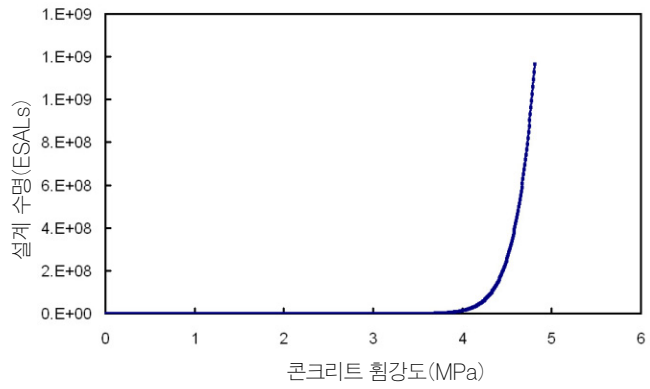


그림 8. 선형 피로파손 공식에 의한 휨강도와 설계 수명의 관계

설계 수명을 10% 감소시키는 휨강도의 손실량이 콘크리트의 휨강도의 크기에 따라 어떠한 차이를 보이는지를 분석하여 그림 9(a)에 나타내었으며, 휨강도의 손실률이 콘크리트의 휨강도의 크기에 따라 어떠한 차이를 보이는지는 그림 9(b)에 나타내었다. 그림 9(a)에서 볼 수 있듯이 콘크리트 휨강도가 증가할수록 설계수명을 10%로 감소시키는 휨강도의 손실량도 점차 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 그림 9(b)에서 볼 수 있듯이 설계수명 10%를 감소시키는 휨강도 손실률은 휨강도의 크기에 관계없이 약 0.4%를 기준으로 거의 일정한 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 AASHTO 피로파손 공식과 지수형 피로파손 공식에 의해 구한 결과와 수치는 다르더라도 매우 유사한 거동임을 알 수 있다.

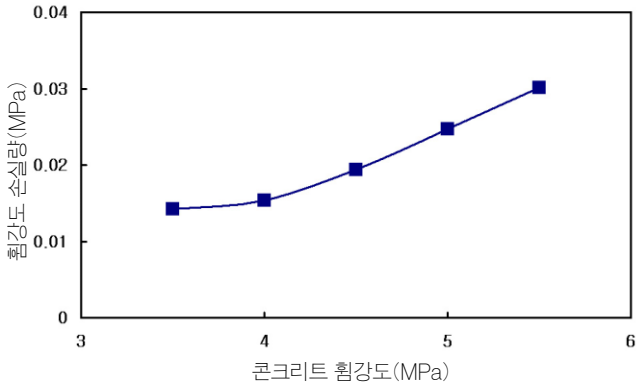


그림 9(a). 선형 피로파손 공식 사용 시 설계 수명 10% 감소에 대한 휨강도와 휨강도 손실량의 관계

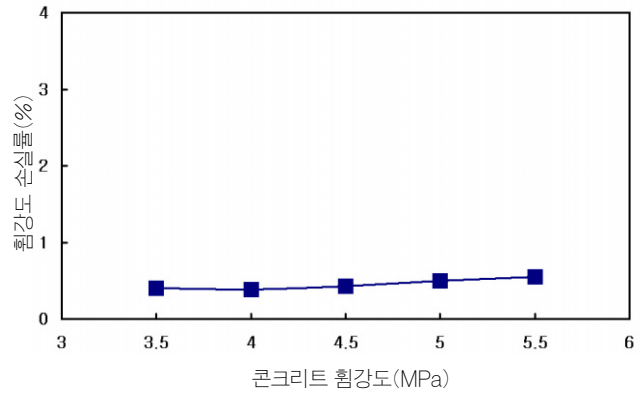


그림 9(b). 선형 피로파손 공식 사용 시 설계 수명 10% 감소에 대한 휨강도와 휨강도 손실률의 관계

2.4. 피로 파손 공식에 따른 분석 결과 비교

그림 10은 AASHTO, 지수형, 선형 피로파손 공식을 사용하여 구한 설계수명 10% 감소에 대한 콘크리트 휨강도와 휨강도 손실과의 관계를 비교하여 나타내었다. 그림 10(a)에서 볼 수 있듯이 AASHTO 피로파손 공식이 슬래브 설계 수명 10% 감소에 대한 휨강도 손실량이 가장 큰 것으로 나타났고 선형 피로파손 공식이 가장 적은 것으로 나타났다. 이는 선형 피로파손 공식을 사용하면 휨강도의 손실이 미소하더라도 설계수명의 감소에 큰 영향을 미칠 수 있다는 것을 의미한다. 반대로 AASHTO 피로파손 공식을 사용하면 휨강도 손실에 대한 설계수명의 손실이 그리 민감하지는 않다는 것을 알 수 있다. 그림 10(b)에서도 마찬가지로 설계수명 10% 감소에 대한 휨강도 손실률은 AASHTO 피로파손 공식과 지수형 피로파손 공식은 매우 비슷한 결과를 보여 주고 있으며 선형 피로파손 공식은 상대적으로 매우 작은 값을 나타내고 있는 것을 볼 수 있다.

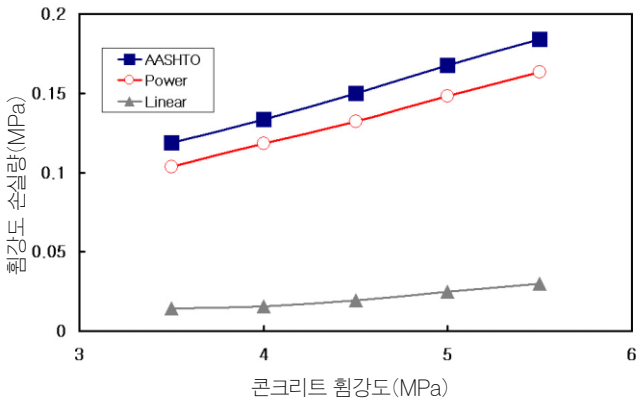


그림 10(a). 각 피로파손 공식 사용 시 설계 수명 10% 감소에 대한 휨강도와 휨강도 손실량의 관계

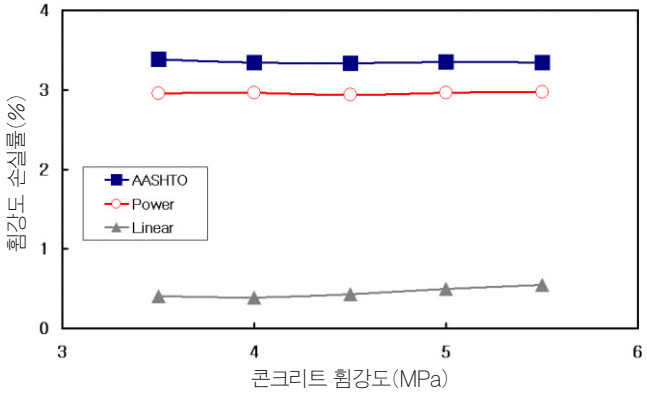


그림 10(b). 각 피로파손 공식 사용 시 설계 수명 10% 감소에 대한 휨강도와 휨강도 손실률의 관계

여러 종류의 피로파손 공식을 이용하여 콘크리트 휨강도에 대해 분석한 결과, 일정한 포장 설계 수명 감소에 대한 휨강도 손실량 및 손실률의 크기는 수치상 다소 차이는 있지만 비슷한 양상을 보이는 것을 알 수 있었다. 정해진 설계 수명 감소율에 대한 휨강도 손실량은 휨강도가 커지면 거의 선형으로 증가하게 되며 휨강도 손실률은 휨강도 크기에 상관없이 거의 일정한 것을 알 수 있었다. 따라서 휨강도에 대한 지불규정 적용 시에 휨강도 손실량을 기준으로 공사비 차등적용 범위를 결정하는 것이 아니라 휨강도 손실률을 기준으로 범위를 결정하는 것이 타당한 것을 알 수 있다. 또한 AASHTO

피로파손 공식을 사용하였을 경우에 동일한 설계수명 감소에 대한 휨강도 손실률이 가장 크기 때문에 국내에서 휨강도에 대한 지불규정 적용 시 이보다 더 여유 있는 기준을 설정하는 것이 초기 지불규정 적용에 있어서 필요하다고 판단된다.

3. 표면 평탄성 분석

콘크리트 포장의 표면 평탄성은 포장체의 기능적 측면과 구조적 측면에서 모두 중요시 되는 인자이다. 표면 평탄성이 좋지 못하면 주행성이 감소하여 사용자의 불편을 초래하여 포장의 기능적 문제를 야기하게 된다. 또한 표면 평탄성이 나빠지면 차량에 의해 작용하는 하중이 동적하중으로 변화하게 되며 이러한 동적하중은 정적하중에 비해 상당히 커질 수 있다. 이러한 동적하중이 반복적으로 작용하면 포장의 표면 평탄성은 점차적으로 더 나빠지게 되며 결국 포장체의 조기 파손을 야기하게 된다. 따라서 표면 평탄성은 지불규정에서 반드시 다루어져야 하는 중요한 인자라 할 수 있다.

일반적으로 포장의 표면 평탄성을 정의하는 지수로는 PSI(Present Serviceability Index), PrI(Profile Index), IRI(International Roughness Index)가 있다. AASHTO 피로파손 공식은 PSI값을 사용하고 있으며 이를 이용하여 평탄성에 대한 분석을 수행하였다. 먼저 초기 평탄성이 포장 수명에 어떠한 영향을 미치는 지를 AASHTO 피로파손 공식을 이용하여 분석하여 그림 11에 나타내었다. 그림에서와 같이 초기 PSI의 값이 커짐에 따라 도로 포장의 설계 수명은 선형으로 증가함을 알 수 있다. 따라서 표면 평탄성은 콘크리트 포장 수명에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

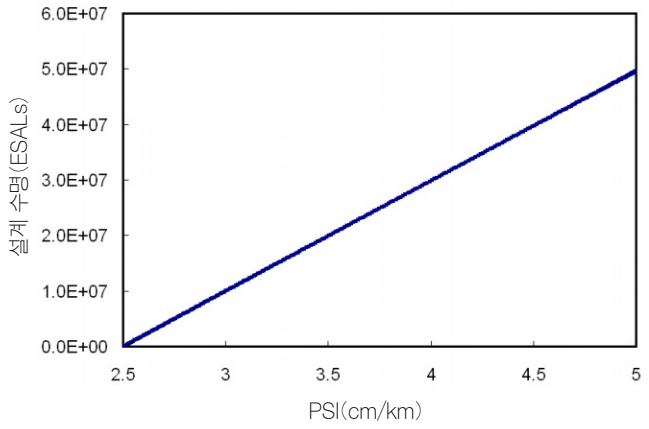


그림 11. 초기 PSI와 설계 수명의 관계

다음은 IRI 값에 따른 포장의 설계수명 변화를 분석해 보았다. PSI와 IRI의 관계는 식 (6)을 이용하여 정의할 수 있다(Huang, 1993).

$$PSI = 5 + 0.6046x^3 - 2.2217x^2 - 0.0434x \quad (6)$$

여기서, x는 $\log(1+SV)$이며 SV는 slope variance를 나타낸다. 또한 x는 IRI와 식 (7)과 같은 관계를 가지고 있다.

$$x = 2.2704(IRI)^2 \quad (7)$$

따라서 식 (6)과 (7)을 이용하여 PSI와 IRI의 관계를 유추할 수 있다. 이러한 관계를 이용하여 포장 평탄성 지수인 IRI 값과 포장의 설계수명 관계에 대하여 분석하여 그림 12에 나타내었다. IRI는 PSI와 달리 값이 작을수록 평탄성이 좋음을 의미한다. 그림에서 볼 수 있듯이 초기 IRI값이 커짐에 따라 설계수명은 작아짐을 알 수 있다. 하지만 IRI값의 변화에 따른 설계 수명의 변화 양상은 PSI값의 변화에 따른 설계 수명의 변화와는 다소 차이를 보이고 있다. PSI와 설계수명은 거의 선형적인 결과를 보인 반면 IRI는 0에서 약 0.3까지는 설계 수명의 변화가 거의 없다가 그 이후부터는 거의 선형적으로 줄어드는 것을 알 수 있다.

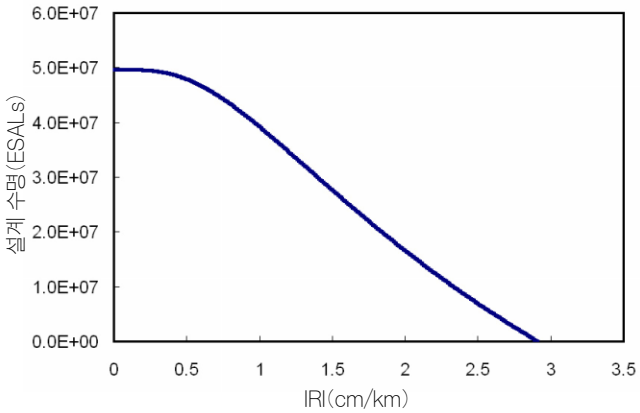


그림 12. 초기 IRI와 설계 수명의 관계

평탄성 지수 IRI와 PrI의 상관관계는 식 (8)과 같이 정의된다(김국한 외, 2003).

$$\Pr I = 5.3026(IRI)^2 - 7.4348(IRI) + 5.3141 \quad (8)$$

식 (6), (7), (8)을 이용하여 PrI와 콘크리트 포장의 설계수명과의 관계에 대하여 분석하여 그림 13에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 PrI가 증가하면 설계수명이 감소하게 된다. 하지만 IRI의 분석에서와는 다르게 PrI가 작을 때는 PrI가 미소하게 증가해도 설계수명이 급격히 감소하게 된다. 이와 같이 어떠한 평탄성 지수를 사용하더라도 평탄성 지수에 따라 설계수명이 크게 영향을 받는 것을 알 수 있다.

AASHTO 피로파손 공식을 이용하여 평탄성에 대한 분석을 수행하는 개념은 휨강도에서와 동일하다. 즉, 설계 PSI

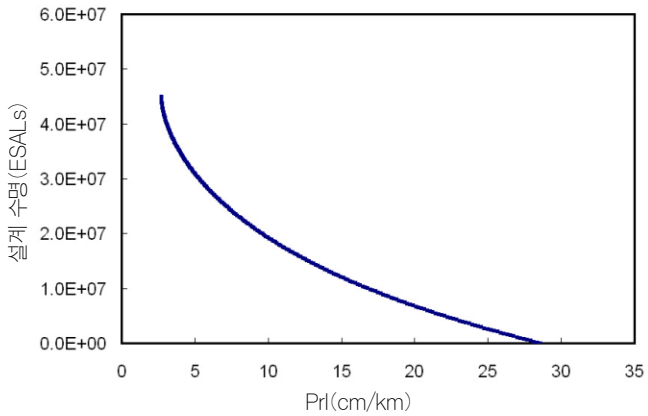
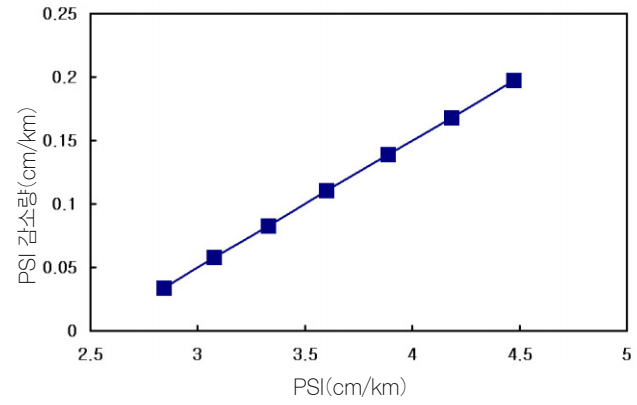


그림 13. 초기 PrI와 설계 수명과의 관계

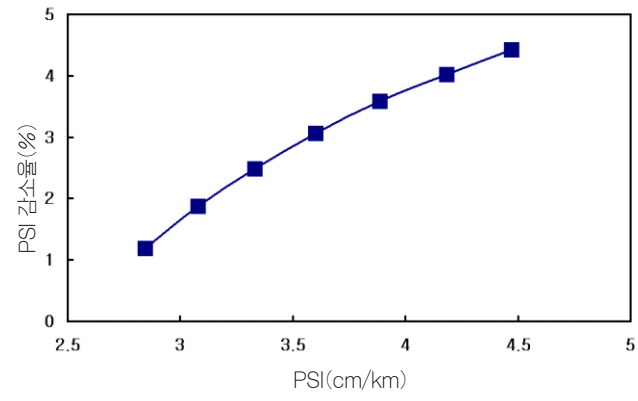
를 공식에 대입하여 이에 해당하는 설계 수명인 설계하중재하 횟수를 구한다. 그 후 특정양의 설계 수명 손실을 선택하여 이에 해당되는 PSI를 AASHTO 피로파손 공식을 역으로 이용하여 구한다. 이렇게 구한 PSI와 설계 PSI의 차이가 지정한 수명 손실에 해당하는 PSI 손실량이 된다. 평탄성 지수를 IRI 또는 PrI를 사용할 때에도 이러한 평탄성 지수와 PSI와의 관계식을 이용하여 동일한 방법으로 분석을 수행할 수 있다.

포장 설계수명을 10% 감소시키는 PSI 감소량이 초기 PSI의 크기에 따라 어떠한 차이를 보이는지 분석하여 그림 14(a)에 나타내었으며 그림 14(b)에는 설계수명을 10% 감소시키는 PSI 감소량과 초기 PSI의 비인 PSI 감소율을 나타내었다. 그림 14(a)에서 알 수 있듯이 동일한 설계수명의 감소율을 나타내는 PSI의 감소량은 초기 PSI에 거의 선형으로 비례하는 것을 알 수 있다. 즉, 초기 평탄성이 우수할수록 동일한 설계수명의 감소율을 가져오는 PSI의 감소량이 증가하게 된다. PSI의 감소율과 초기 PSI의 관계를 살펴보면 (그림 14(b)), 초기 PSI가 우수할수록 PSI의 감소율이 증가하게 된다. 하지만 초기 PSI 증가에 따른 PSI 감소율의 증가 추세는 점차로 줄어드는 것을 알 수 있다. 이러한 분석을 통해 초기 평탄성이 우수하면 동일한 설계수명의 감소를 야기하는 PSI의 감소율은 매우 높으나 초기 평탄성이 불량하면 PSI 감소율이 미소하더라도 상당한 설계수명 손실을 야기하게 되는 것을 알 수 있다.

평탄성 지수 IRI와 PrI에 대해서도 포장 설계수명을 10% 감소시키는 IRI 또는 PrI 증가량 및 증가율이 초기 IRI 및 PrI의 크기에 따라 어떻게 변화하는지를 분석하여 그림 15와 16에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 일반적으로 초기

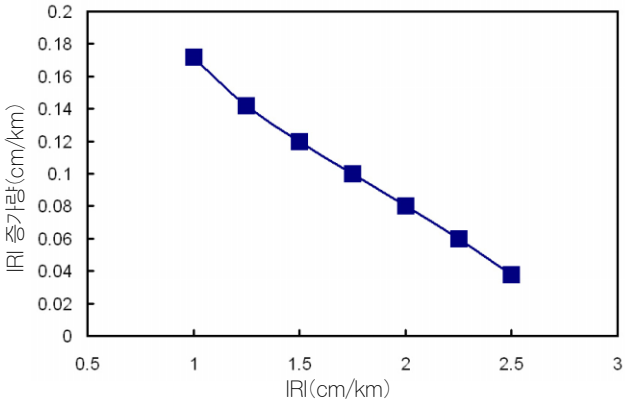


(a) PSI 감소량

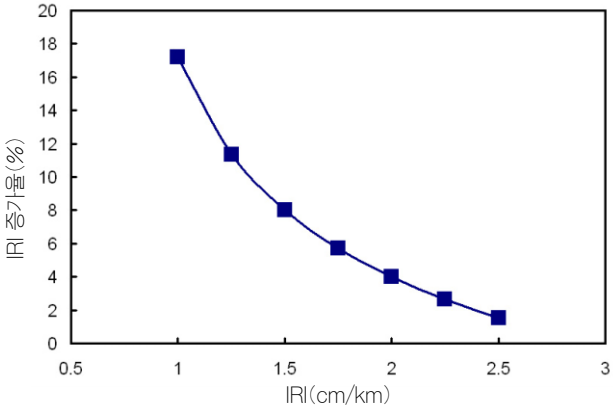


(b) PSI 감소율

그림 14. 설계수명 10% 감소에 따른 평탄성과의 관계

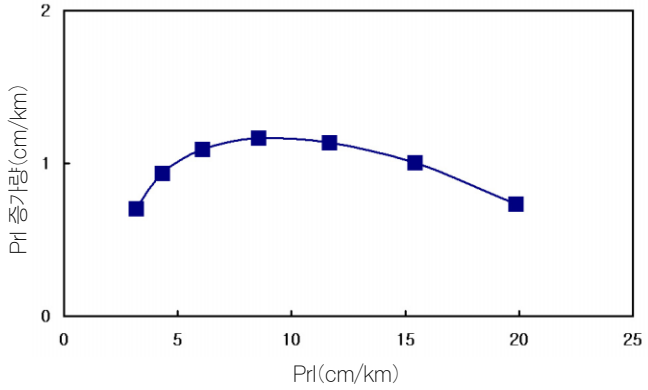


(a) IRI 증가량

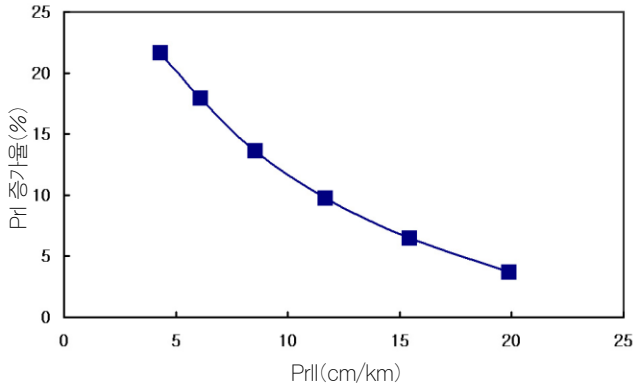


(b) IRI 증가율

그림 15. 설계수명 10% 감소에 대한 평탄성과의 관계



(a) PrI 증가량



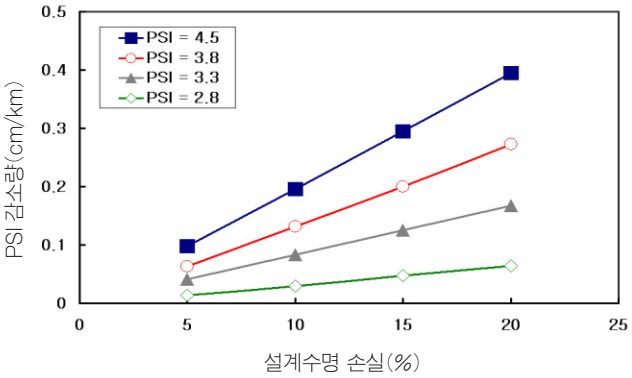
(b) PrI 증가율

그림 16. 설계수명 10% 감소에 대한 평탄성과의 관계

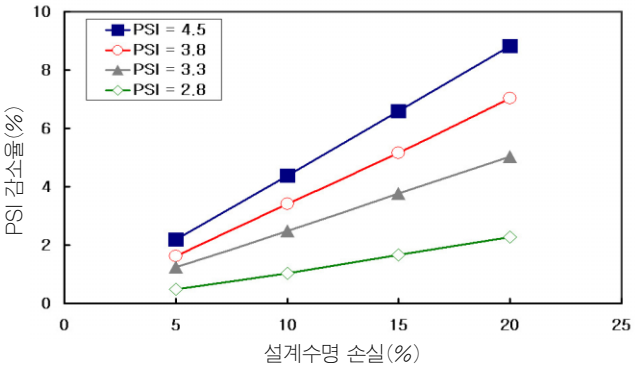
IRI와 PrI가 증가할수록 IRI와 PrI 증가량 및 증가율이 감소하는 것을 알 수 있다. 하지만 PrI의 경우에 PrI가 매우 작을 때는 초기 PrI가 증가할수록 PrI 증가량이 다소 커지는 추세임을 알 수 있다. IRI와 PrI는 PSI와는 반대로 지수가 높을 때 평탄성이 불량한 것이므로 초기 평탄성이 불량할수록 평탄성 지수의 변화가 미소하여도 설계수명 감소율에 크게 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 PSI의 분석 결과와 근본적으로 일치하는 것이다. 결과적으로 평탄성 지수에 대한 지불규정을 결정할 때 초기 평탄성이 불량할수록 동일한 설계수명 감소율에 대한 평탄성 지수의 허용범위를 작게 하여야 한다는 것을 알 수 있다.

다음은 초기 PSI 크기에 따른 설계수명 손실과 PSI 감소량 및 감소율의 관계를 분석하여 그림 17에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 초기 PSI가 일정할 때에 설계수명 손실과 PSI 감소량 및 감소율은 선형으로 비례하게 된다. 또한 초기 PSI가 우수할수록 설계수명 손실 증가에 대한 PSI 감소량 및 감소율이 점차로 커지게 된다.

그림 18과 19에 나타낸 바와 같이 IRI와 PrI도 PSI와 마찬가지로 평탄성 지수가 일정할 때 설계수명 손실이 증가할수록 평탄성 지수의 증가량 및 증가율이 선형으로 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 초기 평탄성이 우수할 때(IRI 및 PrI

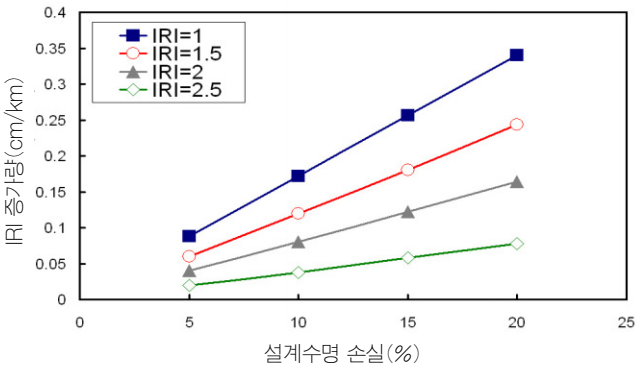


(a) PSI 감소량

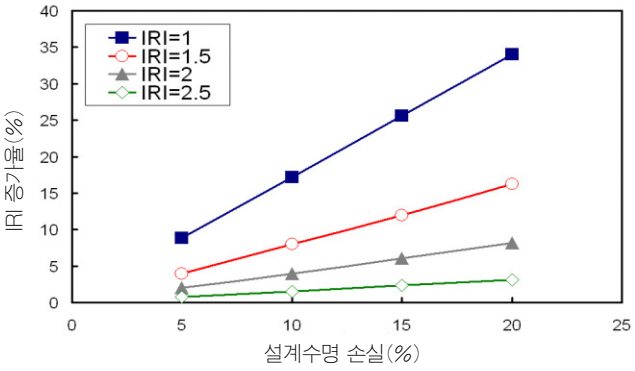


(b) PSI 감소율

그림 17. PSI크기에 따른 설계수명 손실과의 관계

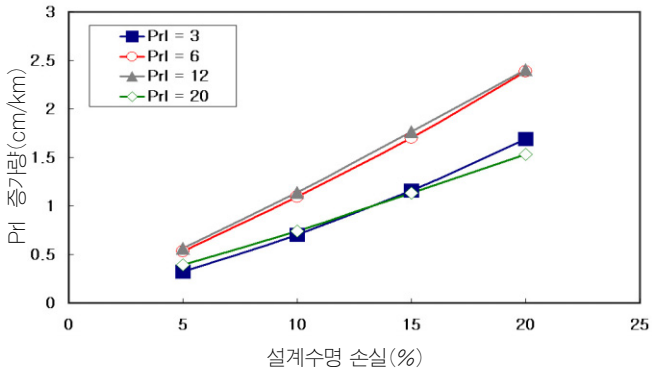


(a) IRI 증가량

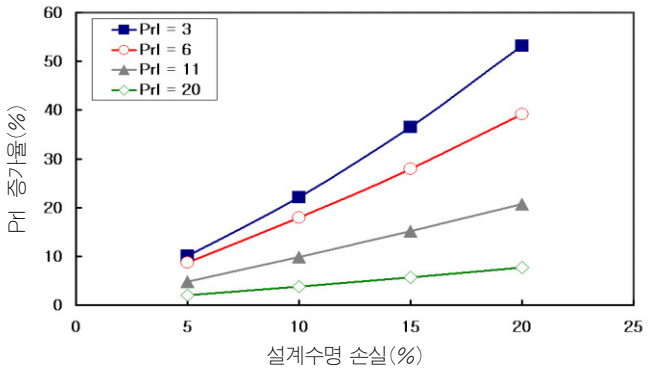


(b) IRI 증가율

그림 18. IRI 크기에 따른 설계수명 손실과의 관계



(a) PrI 증가량



(b) PrI 증가율

그림 19. PrI 크기에 따른 설계수명 손실과의 관계

의 값이 작을 때) 설계수명 손실의 증가에 따른 평탄성 지수의 증가율이 더욱 커지는 것을 알 수 있다. 하지만 평탄성 지수의 증가량은 PrI의 경우에는 초기 지수가 우수하더라도 반드시 설계수명 손실이 증가할수록 지수의 증가량이 점차로 더욱 커지지는 않는다. IRI와 PrI에 대한 전반적인 분석 결과를 살펴보면 PSI에서의 결과와 매우 유사한 것을 알 수 있다. 따라서 동일한 초기 평탄성에 대해서는 설계수명 손실에 따른 지불규정에서의 허용범위는 설계수명 손실과 비례하도록 설정하는 것이 바람직하다고 볼 수 있다.

4. 결론

본 연구는 콘크리트 포장의 지불규정 인자 중 콘크리트 휨강도와 표면 평탄성이 콘크리트 포장 공용성에 미치는 영향에 대하여 분석하고, 이러한 인자에 대한 지불규정을 적용할 때 인자의 크기에 따른 적절한 허용범위를 결정하는 근거를 마련하기 위하여 수행되었다. 먼저 콘크리트의 휨강도에 대하여 AASHTO, 지수형, 선형 피로파손 공식 등의 공용성 모델을 이용하여 휨강도가 포장의 공용성에 미치는 영향을 분석하였으며, 휨강도의 크기에 따라 동일한 수명 손실률을 야기하는 휨강도의 손실량에 대하여 분석을 수행하였다. 또한 콘크리트 포장의 표면 평탄성에 대해서도 휨강도의 분석과 유사한 방법을 사용하여 평탄성과 포장 공용성의 관계를 분석하였으며, PSI, IRI, PrI 등의 평탄성 지수를 사용하여 초기 표면 평탄성에 따른 지불규정 적용 시 허용 범위를 결정하는 기준에 대한 분석을 수행하였다. 본 연구의 결과를 나열하면 다음과 같다.

- 콘크리트 휨강도와 표면 평탄성은 콘크리트 포장의 공용성에 지대한 영향을 미치는 인자로써 우수한 포장의 공용성을 확보하기 위해서는 이러한 인자에 대한 지불규정을 적용하여 적절한 시공 관리가 될 수 있도록 하여야 한다.
- 여러 피로파손 공식을 이용하여 콘크리트 휨강도에 대해 분석한 결과, 일정한 포장 설계수명 감소에 대한 휨강도 손실량 및 손실률의 크기는 수치상 다소 차이는 있지만 비슷한 양상을 보인다. 정해진 설계수명 감소율에 대한 휨강도 손실량은 휨강도가 커지면 거의 선형으로 증가하게 되며 휨강도 손실률(손실량/휨강도)은 휨강도 크기에 상관없이 거의 일정하게 된다.
- 지불규정을 콘크리트 휨강도에 적용할 때 휨강도가 높은 콘크리트는 휨강도 손실 허용범위를 크게 하고 휨강도가 낮은 콘크리트는 허용범위를 좁게 하여야 한다. 즉, 지불규정에서 콘크리트 휨강도를 고려할 때 휨강도의 손실량 대신 휨강도의 손실률을 사용하여야 한다.
- 지정된 콘크리트 설계 휨강도에 대하여 콘크리트 포장의 설계수명 손실율과 휨강도 손실량 및 손실률은 거의 선형으로 비례하기 때문에 지불규정 적용 시에 휨강도 손실에 비례하여 공사비를 차등 적용하는 것이 바람직하다.
- 여러 피로파손 모델 중에 AASHTO 피로파손 모델을 사용하였을 경우에 동일한 설계수명 감소에 대한 허용 휨강도 손실률이 가장 크기 때문에 국내에서 콘크리트 휨강도에 대한 지불규정 적용 시 이보다는 여유 있는 기준을 설정하여 초기 지불규정 적용을 유연하게 할 필요가 있다.
- 콘크리트 포장의 표면 평탄성을 PSI, IRI, PrI 등의 평탄성 지수와 AASHTO 피로파손 모델을 이용하여 분석한 결과 동일한 설계수명의 감소율을 가져오는 평탄성 지수의 변화량 및 변화율은 평탄성이 우수할수록 증가하는 것을 알 수 있다.
- 평탄성 지수에 대한 지불규정을 결정할 때 초기 평탄성이 불량할수록 동일한 설계수명 감소율에 대한 평탄성 지수의 허용범위를 작게 하여야 한다.
- 초기 설계 평탄성이 지정되어 있을 경우에 설계수명 손실에 따른 지불규정에서의 허용범위는 설계수명 손실과 비례하도록 설정해야 한다.

감사의 글

본 연구는 한국건설교통기술평가원의 건설교통R&D정책 인프라사업의 일환인 성능중심의 건설기준표준화 연구-도로포장 및 콘크리트 구조물 중심연구 중 공용성을 기반으로 한 지불규정 개발 연구에서 수행되었음.

참고 문헌

김국한, 이병덕, 최고일, 양성철 (2003). "평탄성 지수 IRI와 PrI의 상관관계에 관한 연구" *한국도로포장공학회논문집*, 제5권, 제1호, pp. 11-18.

서봉교 (2009). "*콘크리트 도로 포장 품질 및 성능 향상을 위한 지불규정 개발 기초 연구*", 석사 학위 논문, 경희대학교.

American Association of State Highway and transportation Officials (1993). *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*, AASHTO.

Highway Research Board (1962). "The AASHO Road Test," *Special Report 61E*, HRB, Washington, D.C.

Huang, Y. H. (1993). *Pavement Analysis and Design*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.

Kesler, C. E. (1953). "Effect of speed of testing on flexural fatigue strength of plain concrete," *Proceedings of Highway Research Board*, Vol. 32, No. 5, pp. 251-258.

Mindness, S., Young, J. F. and Darwin, D. (2003). *Concrete*, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.

Vesic, A. S. and Saxena, S. K. (1969). "Analysis of structural behavior of AASHO Road test rigid pavements," *Highway Research Record*, No. 291, HRB, pp. 156-158.

Westergaard, H. M. (1925). "Stresses in concrete pavements computed by theoretical analysis." *Public Roads*, Vol. 7, pp. 25-35.

접 수 일 : 2009. 10. 20
심 사 일 : 2009. 10. 20
심사완료일 : 2009. 11. 13