

중부고속도로의 구조적 성능 평가

Structural Evaluation of Jungbu Expressway

유태석* · 한승환**

Yoo, Tae Seok · Han Seung Hwan

1. 서론

중부고속도로가 1987년 12월 3일로 개통된 이후 공용기간이 14년에 가까워지고 있다. 개통초기 2001년에 하루 29,000~63,000대의 교통량을 처리할 것으로 기대되었던 중부고속도로는 2000년 10월 기준으로 하루 43,000~79,000대의 교통량을 큰 파손 없이 처리하고 있으나 일부 구간에서 표면바라, 골재분리, 균열 및 스폐링 등의 파손이 관찰되고 있다. 이러한 이유로 도로연구소에서는 1999년도에 중부고속도로 전 구간에 걸쳐 현장 외관조사를 실시하여 포장의 파손상태를 분석하고 평가한 바 있다. 현재 중부고속도로에는 확장공사가 진행 중에 있으며 교통을 차단한 채 성능개선이 진행 중에 있다. 본 연구에서는 이러한 구간에 대하여 비파괴 시험장비를 통한 포장상태를 조사를 수행하였고 그 결과를 통해 개통 당시에 비해 어느 정도의 성능저하가 발생하였는지를 평가하였다.

2. 성능평가절차

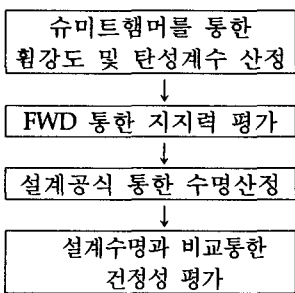


그림 1. 성능평가절차

본 연구에서는 중부고속도로의 구조적 성능평가를 위해 AASHTO의 덧씌우기 두께설계 절차 가운데 일부를 사용하였다. 그러나 AASHTO의 86년도 설계 개념이 국내에서 사용되고있지 못하는 점을 고려하고 잔존 수명의 개념보다는 성능저하의 정도를 구하는 의미에서 81년도 설계식을 사용하였다. 또한 콘크리트의 강도평가 부분에서 FWD를 통한 탄성계수 역산결과나 코어시험 결과를 사용하도록 하고있으나 콘크리트 포장에서의 탄성계수의 역산결과 해석에서 아직까지 보완이 필요하고 코어시험은 여러 곳에 적용할 수 없는 점을 생각하여 슈미트햄머를 통한 휨강도 및 탄성계수 계산을 수행하고 코어시험 결과와 비교 및 평가하였다.

성능평가절차를 요약하면 그림 1과 같다.

* 정회원 · 한국도로공사 연구개발실 포장연구그룹 연구원 · 02-2230-4659 (E-mail: Taeseok@freeway.co.kr)

** 정회원 · 한국도로공사 연구개발실 포장연구그룹 책임연구원 · 02-2230-4854 (E-mail: hansu@freeway.co.kr)



3. 콘크리트 강도평가

3.1 평가방법 및 결과

콘크리트의 강도평가는 슈미트 해머를 이용하는 반발경도법을 사용하여 수행되었는데 표면반발도로 부터 콘크리트의 강도 추정은 사용자에게 의해 미리 작성된 반발도와 강도 관계를 사용하거나 실험에 의한 연구결과를 이용한다. 본 연구에서는 사용빈도가 높은 일본 재료학회 식과 동경도 건축재료시험소의 식을 사용하여 콘크리트의 강도를 구한 후 두 값의 평균값을 압축강도로 결정하였다. 위에서 얻어진 강도를 통해 콘크리트의 탄성계수와 휨 인장강도를 추정하였으며 탄성계수는 ACI에서 제안한 공식을 휨 인장강도는 Gardner와 Poon의 연구결과로 얻어진 공식을 사용하였다.

$$f_c = -184 + 13R \quad (\text{일본재료학회 공식})$$

$$f_c = -110 + 10R \quad (\text{동경도 건축재료시험소 공식})$$

$$E_c = 15,000\sqrt{f_c} \quad (\text{kg/cm}^2) \quad (\text{ACI})$$

$$f_t = 0.3(f_c)^{2/3} \quad (\text{MPa}) \quad (\text{Gardner \& Poon})$$

단 여기서 얻어지는 인장강도는 할열 인장강도이므로 Raphael 등의 연구결과를 토대로 약 23% 정도 인상한 값을 휨 인장강도로 사용하였다. 그리고 재령보정은 실시하지 않았는데 이는 포장체의 구조적 특성상 포장상면이 마모면이고 포장체의 두께가 상대적으로 작아 표면에 대한 보정 요인이 필요치 않은 것으로 판단되었기 때문이다. 슈미트햄머는 FWD 시험이 실시된 장소에 행하여졌고 의심스러운 구간을 제외하고 대략 400m마다 측정하였다.

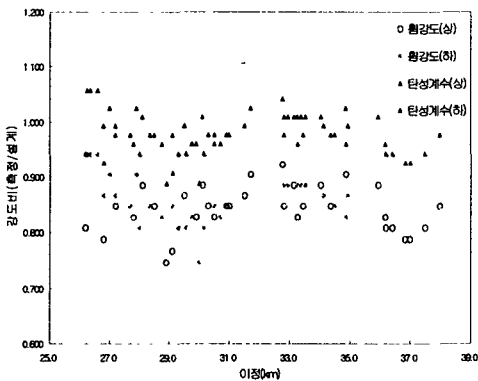


그림 2. 강도평가 결과

구해진 탄성계수와 휨 인장강도는 설계탄성계수인 4×106 psi와 설계 휨 인장강도인 650psi와 비교하였고 25.4km~38.2km에 대한 결과를 그림 2와 같이 이점별로 표시하였다. 그림과 같이 휨 인장강도는 평균적 설계 값의 약 85%를 및 탄성계수는 약 98%를 나타내었다. 이외에 0.98km~4.00km 구간은 휨강도의 경우 92%를 탄성계수의 경우 104%를 나타내었고 17.35km~18.05km의 경우 휨강도는 88%를 탄성계수는 101%를 나타내었으며 21.10km~22.20km에서는 휨강도 88% 및 탄성계수 101%를 나타내어 양호한 상태를 보였다.

3.2 코어채취를 통한 강도평가 및 균열전파 깊이 측정

슈미트햄머를 통한 비파괴시험 결과를 검증하고 균열이 발생한 구간의 균열침투깊이를 추정하기 위



하여 JCP(30k 부근 하행) 및 CRCP(36k 부근 상행)의 세로균열이 심하게 발생한 구간에서 코아를 채취하고 할렬인장강도 시험을 실시하였다. 코아는 CRCP구간에서 2개, JCP구간에서 3개를 채취하였고 채취된 코아의 균열과 철근을 피하면서 최대한 많은 실험데이터를 확보하기 위해서 10cm길이의 코아를 절단하여 얻어진 6개의 시편에 대하여 실험하였다. 균열의 진전깊이를 측정된 결과 CRCP의 경우 그림 3에서와 같이 6.5cm를 나타내었고 JCP의 경우 그림 4에서와 같이 5.5cm를 나타내었다.

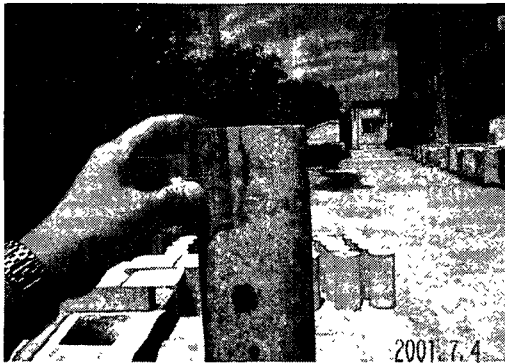


그림 3. CRCP에 발생한 세로균열의 진전깊이

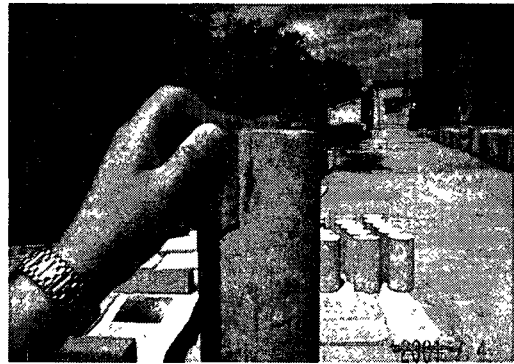


그림 4. JCP에 발생한 세로균열의 진전깊이

표 1. 할렬인장강도 시험결과

시험체명	파괴하중 (ton)	직경 (cm)	길이 (cm)	할렬인장응력 (kg/cm ²)
JCP 무 균열부	5.332	10	10.0	33.94
	5.252	10	10.0	33.48
JCP 십자균열부	5.988	10	9.5	40.23
JCP 세로균열부	6.672	10	10.0	42.69
	7.932	10	10.0	50.25
CRCP 세로균열부	6.236	10	10.0	40.10

코아시험 결과는 표 1과 같고 평균 40kg/cm²의 값을 나타내었다. 이것은 시험결과에 대한 크기 효과 보정, 습도 등과 같은 여러 가지 실험조건에 의한 오차를 고려하더라도 할렬인장강도의 결과에 23%의 할증을 통해 휨강도를 추정하고 코아에 의한 강도가 실제의 강도보다 낮게 나타나는 것을 고려하면 현재의 콘크리트 물

성은 설계 값과 비교할 때 양호한 것으로 판단할 수 있으며 슈미트햄머에 의한 결과가 안전 측의 값을 주고 있음을 알 수 있었다.

4. 지지력 평가

지지력 평가는 Falling Weight Deflectometer로 얻은 처짐을 이용하여 Westergaard의 공식을 통해 역산하는 AASHTO의 방식을 사용하였다. 그림 5는 25.4km~38.2km의 구간에서 측정된 동적지지력 값으로 지지력의 분포는 매우 다양하게 나타났고 상행의 경우 평균 350pci를 하행의 경우 평균 370pci를 나타내어 지지력 저하를 나타내고 있는 것으로 판단되었다. 만남의 광장 부근의 CRCP구간에 대한



지지력 측정결과 420pci를 나타내었고 측정당시의 대기온도가 높아 지지력이 저 평가된 점을 고려하면 양호한 지지력을 확보하고 있는 것으로 나타났다. 17.35km~18.05km에서의 측정결과 60pci를 나타내어 매우 낮은 수준의 지지력을 보였다. 이것은 측정당시 기온이 높아 온도구배가 발생하여 낮은 지지력을 보이는 점을 감안하더라도 낮은 수준의 값으로 외관조사에서 국부적인 파손을 보이지 않는 것으로 보아 일부가 아닌 전반적인 지지력 감소의 현상으로 판단되며 지속적인 관찰을 필요로 하는 것으로 판단된다.

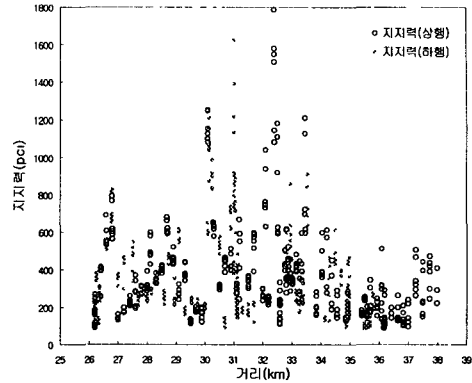


그림 5. 지지력 평가결과

5. 건전성 평가

5.1 평가방법 및 가정사항

중부고속도로의 지지력과 강도를 평가하였으나 이들 개개의 값으로는 정성적으로 어느 정도의 성능 감소가 발생하였는지를 짐작할 수 있으나 이로 인해 포장이 어떠한 상태에 있는지를 정량적으로 판단하기에는 무리가 있다. 이러한 이유로 아래에 제시한 AASHTO의 두께설계공식을 역으로 이용하여 주어진 강도와 지지력으로 감당할 수 있는 향후의 등가교통량을 추정해 보는 방법으로 건전성을 평가하기로 하였다.

$$\log W_{8.2} = 7.35 \log(D+1) - 0.06 + \frac{\log[\Delta PSI / (4.5 - 1.5)]}{1 + 1.624 \times 10^7 / (D+1)^{8.46}} + (4.22 - 0.32P) \log \left[\frac{S_c(D^{0.75} - 1.132)}{215.63 [D^{0.75} - 18.42 / (E_c/k)^{0.25}]} \right]$$

여기에서, $W_{8.2}$ = 공용기간 동안 18kip 등가단축하중의 반복횟수

D = 슬래브 두께 (inch), J = 하중전달 계수

S_c = 콘크리트의 파괴계수 (psi), E_c = 콘크리트의 탄성계수 (psi)

k = 노상지지력 계수 (pci), $\Delta PSI = 4.5 - Pt$ (Pt : 최종 공용성지수)

5.2 평가결과

중부고속도로 설계 당시의 물성 값을 설계식에 적용하는 경우 설계수명은 4.855×10^7 ESAL을 얻을 수 있었고 현재의 평가수명은 위의 공식에 본 조사에서 얻어진 콘크리트 탄성계수, 노상 지지력 계수 및 슬래브 두께를 넣어 얻을 수 있었다. 건전성 평가는 설계 잔존수명과 측정된 값을 넣어 얻어진 잔존수명의 비로 나타내었는데 추정결과는 그림 6과 같고 이를 설계수명과 비교한 결과 상행의 경우 평균 36%를 하행의 경우 평균 38%를 나타내었다. 25.4~38.2km구간에 대한 잔존수명 추정결과는 그림

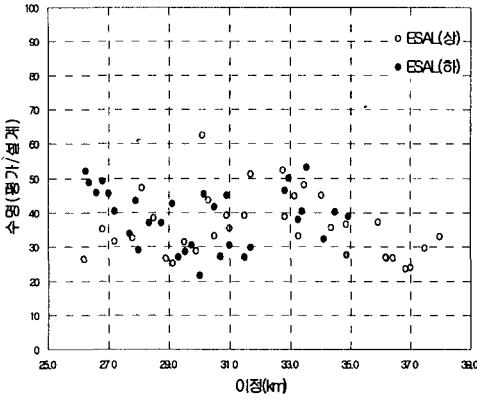


그림 5. 이정별 건전도 평가결과

11과 같다. 이 밖에 0.98km~4.00km에서는 휨강도와 지지력이 양호하여 평균 50%의 잔존수명을 17.35km~18.05km에서는 휨 강도는 양호하나 지지력 상태가 좋지 않아 평균 30%의 잔존수명을 나타내었다.

6. 결론

중부고속도로의 구조적 건전성을 평가하기 위해서 콘크리트의 강도와 지지력을 평가하였고 이들의 변화에 따른 포장의 건전성을 조사하기 위해 AASHTO설계식을 이용하였다. 휨강도와 지지력을 이용하여 건전성을 평가한 결과 25.4km~38.2km의 경우 설계수명의 36~38%를 나타내어 실제 교통량에 의해 추정된 누적피로

도 만큼 피로가 누적된 것은 아닌 것으로 판단되었다. 특히 0.98km~4.00km의 경우 많은 교통량과 일부의 파손상태를 나타내고 있음에도 지지력과 콘크리트의 강도가 양호하여 설계수명의 50%를 나타내었다. 그러나 지지력이 낮게 나타난 17.35km~18.05km 구간의 경우 30%의 건전도를 나타내었고 일부 구간에서도 콘크리트의 강도 혹은 지지력의 저하로 낮은 건전도를 나타낸 구간이 있어 이러한 구간은 포장의 변화양상을 주기적으로 지켜보아야 할 것으로 판단되었다.

본 논문에서 적용한 일련의 평가절차는 하중전달계수의 합리적인 적용방안 확립과 탄성계수의 계산이 국부적인 시험에 의해 도출되었다는 점을 가지고 있으나 추가적인 데이터의 확보를 통해 향후 FWD를 통한 포장평가방식에서 더 큰 진보가 생길 때까지 실용적이고 합리적인 평가결과를 제시할 것으로 기대된다.

참고문헌

1. AASHTO, "AASHTO Guide for Design of Pavement Structures," 1996.
2. Neville, A. M., "Properties of Concrete : Third Edition," 1981.
3. Raphael, J. M., "Tensile Strength of Concrete," Journal of ACI, Vol.81, No.2, pp158-165, 1984.