

시멘트 콘크리트 포장의 피로실험과 프로그램 작성

A Laboratory Study of the Fatigue and Development of Analysis Program of Concrete Pavements

엄주용* 임승욱** 윤기용***
Eum Joo Yong Lim Seung Wook Yoon Ki Yong

ABSTRACTS

In the present study, a series of static load test and fatigue test were carried out to investigate the behavior of the CRCP. The specimens were sized to 25% of real one lane CRCP. The fatigue tests were carried out for the repetitive load as much as 16%, 39%, 40%, 48%, 59% and 78% of the max. static load for the center or corner loading. Compared the field test with laboratory test for FWD, it is an equipment useful to maintenance and manage of the concrete pavements.

1. 연구배경 및 개요

1.1 연구 배경

시멘트 콘크리트 포장은 대형 차량 하중에 대한 지지력이 우수하고 수명이 길며, 시공후에 잦은 유지 보수가 필요치 않다는 측면에서 도입이래 사용이 급증하였고, 앞으로 건설되는 대규모 고속도로들도 콘크리트 포장으로 시공할 가능성이 증대되고 있다. 이와 같이 시멘트 콘크리트 포장의 물량은 급증하고 있는 반면 기존의 시멘트 콘크리트 포장은 점점 노후화 되고 있으나 국내에는 아직 유지 보수에 대한 합리적인 관리체계가 마련되어 있지 않은 실정이다.

이와 같은 효율적인 포장유지관리를 위해서는 방대한 범위의 포장관련 데이터베이스 구축, 시멘트 콘크리트 포장의 파손 원인 분석, 포장의 구조진단, 보수시기 및 보수방법결정 등 여러 방향의 연구 조사가 필요하다. 이 가운데서 시멘트 콘크리트 포장의 파손 원인 파악 및 파손 예측은 종합적인 포장유지관리체계구축의 기초가 되므로 무엇보다 선행되어야 할 연구과제라 할 수 있다. 따라서, 본 연구는 시멘트 콘크리트 포장을 모사한 피로실험을 실시하여 포장의 피로거동을 파악하여 포장 수명예측에 활용하고자 수행되었다. 또한 비파괴시험기인 FWD를 이용한 포장의 구조진단 능력을 검증하고, 포장층의 물성을 예측하는 역산프로그램

* 한국도로공사 도로연구소 책임연구원

** 한국도로공사 도로연구소 연구원

*** 고려대학교 토목환경공학과 박사과정 수료

램을 작성하여 FWD의 활용 방안을 정립하고자 하였다.

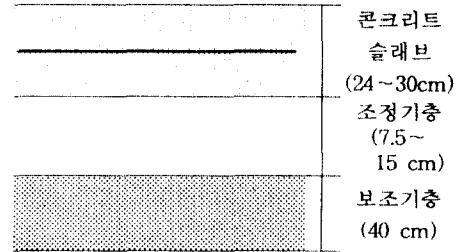
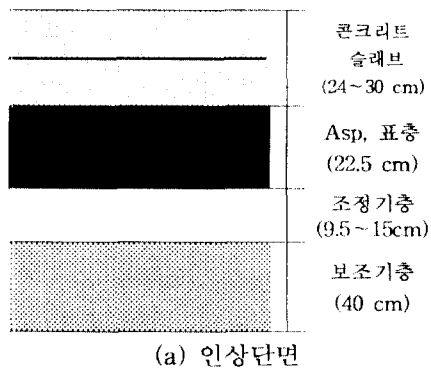
1.2 연구 범위

본 연구의 주된 연구범위는 CRCP의 수명-피로거동 분석을 중심으로 한 포장수명예측과 FWD를 이용한 포장층물성 예측 역산프로그램의 작성이다. CRCP의 피로실험은 주행 차선 실규격을 상사한 시험체에 대하여 실시하였다.

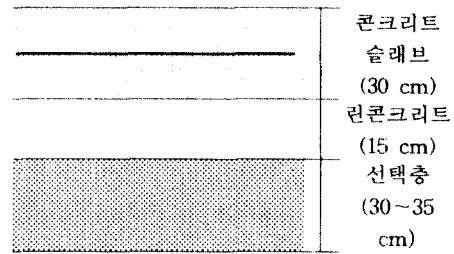
2. CRCP의 기본 이론

2.1 국내 CRCP 현황

국내 연속철근 콘크리트포장(CRCP)은 1984년에 경부선 일부 구간에 대해 확장 및 포장개량의 목적으로 처음 도입된 이래 경부선 개량 및 확장구간과 중부선 신설포장에 본격적으로 도입되어 현재 총 연장이 190km(2차선 기준)에 이르고 있다. 국내 고속도로 CRCP의 대표적인 단면을 보이면 다음 그림 1과 같다.



(b) 절삭단면



(c) 신설단면

그림 1. 국내 CRCP 포장단면의 예시

2.2 CRCP 횡방향균열의 발생인자

횡방향 균열발생에 영향을 미치는 인자는 상당히 많은데 크게 콘크리트 성질, 철근의 성질, 포장의 기하학적 구조, 환경적 요인 및 차량하중으로 분류할 수 있다. 이를 정리하면 다음 표 1과 같다.

3. 시멘트 콘크리트 포장의 피로실험

3.1 개요

2장에서 언급한 바와 같이 시멘트 콘크리트 포장의 손상은 크게 교통하중과 환경적 요인(건조수축, 온도변화 등)에 기인하므로 장시간의 관찰이 요구된다. 국내에서는 아직까지 시멘트 콘크리트 포장의 공용년수가 작기 때문

표 1 횡방향 균열발생의 영향인자

분 류	영향인자	균 열 내 용
철근의 성질	철근량	○ 많으면 구속효과 증가로 균열간격 작아짐, 편치아웃 ○ 적으면 균열간격 증가로 Spalling 가능성
	철근직경	○ 철근직경이 작을수록 구속효과 증가로 균열간격 감소 ○ 철근의 부착면적비와 균열간격 반비례
	배근위치	○ 상부에 배근하는 것이 균열제어에 효과적
포장구조	슬래브 두께	○ 증가시 윤하중응력 감소하여 균열간격 증가 ○ 증가시 처짐감소하여 골재맞물림 손상 예방, 연속성 유지
	하부층	○ 재령초기 하부층 마찰이 균열 영향
환경인자 (재령초기)	양생온도	○ 클수록 균열발생 많아 균열간격 작아짐
	대기온도	○ 높으면 불규칙한 균열 많아짐
	타설시기	○ 가을철 타설이 상대적으로 균열 많음 ○ 오전 타설이 상대적으로 균열 많음
	온도강하	○ 강하량이 클수록 균열 많음
	상대습도	○ 낮으면 건조수축 증가로 불규칙 균열 발생
차량하중	교통량	○ 피로균열

에 시험 포장 구간의 상태를 분석하여 설계 및 보수를 위한 자료로 활용하기 어려운 실정이다.

이상을 고려하여 본 연구에서는 시멘트 콘크리트 포장에 대한 피로실험을 수행하고 누적교통하중에 의한 포장슬래브의 피로-수명 거동을 분석하여 현재 공용중인 시멘트콘크리트 포장 공용상태평가의 기초자료를 구하고자 하였다. 이를 위해 시험체의 크기, 시험체의 경계조건, 지반조건, 재하피로하중의 크기, 배합설계등을 사전에 결정하였다.

시험체의 크기는 피로파괴메카니즘을 충분히 만족시키는 상사법칙을 적용하여 일정비율(상사율)로 축소된 시험체

를 제작하였다. 본 연구에 채택한 시험체제작 상사율은 1/4 이다.

3.2 시험체 형상의 결정

본 연구에서는 시멘트 콘크리트 포장의 피로실험을 효과적으로 수행하기 위하여 정적하중에 의해 콘크리트 슬래브에 발생하는 응력분포와 처짐량을 파악하고자 유한요소해석을 실시하였다. 이를 통해 다음과 같은 항목을 결정하였다.

- ① 시험체의 길이, ② 차선수,
- ③ 하중작용위치에 따른 응력분포 및 처짐의 비교,

④ 지반조건의 변화에 따른 응력분포 및 처짐의 비교

3.3 시험체의 제작 및 실험

이상으로 보인 해석항목외에도 시험체 지반조건별 응력 및 처짐비교해석 등을통하여 시험변수와 시험체의 형상을 결정하였다. 1/4 상사율에 따라 주행차선 1개 차선에 대한 시험체 콘크리트 슬래브의 크기는 두께 7.5 cm, 주행차선의 폭 1 m, 차량진행방향의 길이 1.4 m로 정리하면 표 2와 같다.

표 2 시험체 콘크리트 슬래브의 크기

구분	중부고속도로	시험체
슬래브 두께	30 cm	7.5 cm
슬래브 폭	4.025 m	1.0 m
슬래브 길이	∞	1.4 m
비 고	주행차선	1차선 1/4

시험체의 휨인장시험결과 평균 41.6 kg/cm²의 휨인장강도를 얻었다. 이 시험체를 지반을 모사한 고무판에 직재하여 하중을 재하하였다.

제 2시험체의 경우 그림에 검게 표시된 하중재하점에 대해 5.2톤의 피로하중을 5Hz의 재하속도로 총 8,500,000회 가력하였다. 그림 2와 그림 3은 이때의 변형률 곡선을 보인 것이다.

3.4 실험결과 분석

CRCP의 정적하중재하실험을 통하여 Punch Out 균열 발생시의 하중을 기준으로 피로하중의 응력수준을 결정하

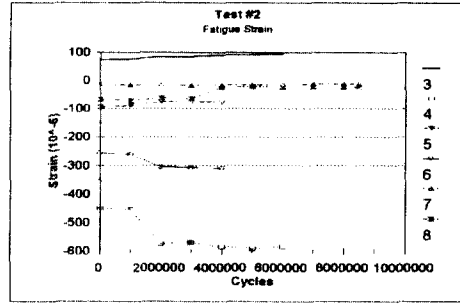


그림 2. 제2시험체의 변형률

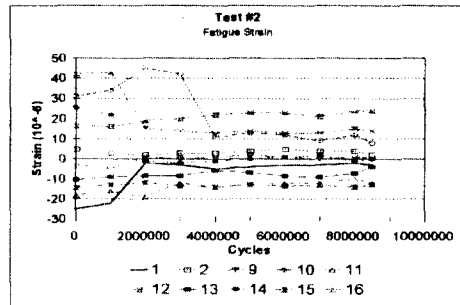


그림 3. 제2시험체의 변형률 곡선

였다. 재하차량의 위치에 따라 슬래브 중앙과 가장자리에서의 정적파괴하중은 각각 13t과 8t으로 측정되었다.

CRCP의 피로실험은 총 6개의 시험체에 대하여 실시하였다. 먼저 재하차량의 위치가 슬래브의 중앙에 위치할 때 피로하중의 응력수준을 16%, 40%, 48% 로 두고 피로실험을 실시하였다. 피로하중의 응력수준을 40%인 5.2t 으로 두고 피로실험을 수행한 결과 펀치아웃(Punch Out) 균열은 6,000,000회 재하에서 발생하였다. 또한 응력수준이 48%인 6.24t 일 경우 4,500,000회에서 발생하였다. 그러나 응력수준이 16%인 2.08t의 피로하중으로 실시한 피로실험은 피로하중재하횟수 10,000,000회까지 가력하였으나 표면 균열을 발견할 수

없었고, 실험시간의 제한으로 피로균열이 발생할 때까지 실험하지 못하고, 실험을 중지하였다. 재하차량의 위치가 슬래브의 가장자리에 위치할 때 피로하중의 응력수준을 39%, 59% 및 78%로 하여 피로실험을 실시하였다. 피로하중의 응력수준이 39%인 3.12t으로 피로실험을 실시하여 Punch Out 균열은 5,000,000회에서 발생하였다. 또한 응력수준이 59%인 4.68t 일때는 Punch Out 균열은 2,000,000회에서 발생하였고, 응력수준이 78%인 6.24t 일때는 Punch Out 균열은 500,000회에서 발생하였다.

4. FWD를 이용한 강성 포장의 평가 방법과 이론

4.1 FWD 현장 실험을 통한 탄성계수와 잔존 수명의 추정

FWD처짐 측정치를 이용하여 포장체 각 층의 탄성계수를 추정하는 전산 프로그램인 ELMOD/ELCON의 입력자료로서 중부고속도로와 88고속도로에 대한 현장 실험을 실시하였다. 시험 구간은 중부 고속도로 94km지점과 88고속도로 52km지점을 선정하였다.

FWD 현장 실험과 Core 채취에 의한 검증 실험을 실시하기 위한 연속철근 콘크리트포장(CRCP : Continuously Reinforced Concrete Pavement) 구간은 중부고속도로 74km 지점으로서 충청도 진천구간에서 50m 간격으로 6개 지점에 대해 현장 실험을 실시하였다. 줄눈콘크리트 (JCP : Jointed Concrete Pavement) 구간은 88고속도로 52km

지점으로서 경상남도 고령 구간에서 50m 간격으로 10개 지점에 대해 현장 실험과 압축실험용 몰드 채취를 실시하였다. FWD 측정 위치는 포장의 중앙 부분에서 실시하였다. 포장 단면의 자료는 표 4와 같다.

표 4 포장 구간의 시험 위치 단면

시험 위치	각 층의 두께(cm)				포장형태
	H ₁	H ₂	H ₃	H ₄	
중부	30	15	40	∞	CRCP
88	30	15	40	∞	JCP

4.2 FWD 현장 측정 실험

본 연구는 우리 공사에서 덴마크로부터 구입한 Dynatest 8000을 가지고 현장 실험을 실시하였다. FWD에 의한 처짐은 7개의 Geophone를 통하여 측정이 가능하며, 측정 데이터는 현장에서 노트북 북 컴퓨터에 입력되어진다. 하중제하는 추의 낙하를 통해 이루어 지는데, 이번 현장 측정에서는 각기 다른 높이에서 하중을 작용시켰다. 각각의 높이에서 세 번에 걸쳐 하중을 작용하여 각 지점별 6번의 하중에 대한 처짐값을 측정하였다. 여기에는 각 구간별로 가장 높은 위치에서 낙하시켰을 때의 처짐값을 나타내었다. 하중단위는 MPa 이다.

표 5, 표6의 처짐값들을 비교하면 같은 하중이 작용할 때, 88고속도로에서 측정한 처짐값이 중부 고속도로 측정한 처짐값보다 크게 나오는 것을 알 수 있다.

표 5 중부 고속도로에서 수행한 FWD
처짐 측정 결과

위치 (km)	하중	처짐 측정 결과(mycrons)						
74.05	1646	228	219	209	198	187	174	171
74.15	1650	204	196	187	181	177	173	169
74.20	1642	226	217	206	193	182	169	163
74.25	1662	259	246	235	219	198	177	169

표 6. 88고속도로에서 측정된 FWD
처짐 측정 결과

위치 (km)	하중	처짐 측정 결과(mycrons)						
52.00	1644	246	231	224	209	196	183	173
52.10	1650	219	211	197	189	182	176	171
52.15	1648	244	230	216	199	184	161	159
52.20	1656	218	210	196	188	181	176	172

다시 말해서 포장의 강성이 크면 즉 탄성계수가 큰 포장일수록 작은 처짐을 나타냄을 알 수 있다.

이를 그림으로 도시하면 선형적인 분포를 가지는 처짐형상들을 얻을 수 있다.

이는 포장체의 탄성 모델을 이용한 포장체 탄성계수 추정 기법이 FWD를 현장 시험 자료로 사용하는 해석에 대해 신뢰성있음을 반증하는 것이다.

4.3 ELCON을 이용한 탄성계수 추정

ELMOD/ELCON 프로그램은 포장체에 의 해석에 있어 고려해야할 많은 변수

를 Parameters File을 통해 역산 과정에 적용시키므로 일보 진전된 프로그램이라 할 수 있으나 우리 나라 실정에 맞게 적절히 사용하기 위해서는 변수 입력에 사용되는 상수값들의 도출에 대한 연구가 많이 이루어져야 할 것으로 사료된다. 이 프로그램을 이용하여 역산한 탄성계수의 결과는 다음 표 7과 표 8에 중부 고속도로, 88고속도로의 탄성계수 값을 나타내었다. 앞에서 언급한 것과 같이 처짐값이 큰 88고속도로가 작은 탄성계수 값을 나타내었다. 이것은 CRCP구간인 중부 고속도로가 공용 연수가 작을 뿐만 아니라 중립축에 철근을 가지고 있어 처짐이 적게 발생된 것으로 판단된다.

표 7. 역산 프로그램 ELCON을 이용한
중부고속도로의 탄성계수(MPa)

위치 (km)	E1	E2	E3	Life (year)	보수두께 (mm)
74.05	32608	387	152	11.8	31
74.15	32875	705	154	24.1	0.0
74.20	29945	435	157	11.5	32
74.25	26547	274	151	5.4	75

표 8. 역산 프로그램 ELCON을 이용한
88고속도로의 탄성계수(MPa)

위치 (km)	E1	E2	E3	Life (year)	보수두께 (mm)
52.00	27151	452	145	10.0	38.0
52.10	22818	1274	151	28.3	0.0
52.15	19446	595	165	7.7	50.0
52.20	22707	976	152	19.3	2.0

4.4 코아시료에 의한 역산 결과 검증

역산 결과를 검증하기 위하여 고속도로에서 코아(Core)를 채취하여 탄성계수 측정 실험과 압축 강도 실험을 실시하였다.

우리 나라 지방서에는 콘크리트 탄성계수 E_c 를 아래와 같이 두고 있다.

$$E_c = w^{1.5} \times 4270 \sqrt{\sigma_{ck}}$$

여기서, w 는 콘크리트의 단위 중량, σ_{ck} 는 콘크리트의 설계 기준 강도를 나타낸다. 일반적인 골재를 이용한 콘크리트의 단위중량을 2.3 ton/m^3 내외로 두었을 때 콘크리트의 탄성계수는 아래 식과 같다.

$$E_c = 15000 \sqrt{\sigma_{ck}}$$

초기 시공시 중부 고속도로 및 88고속도로의 설계기준 휨강도가 45 kg/cm^2 인 바 콘크리트의 휨강도가 압축강도의 1/5 -1/8 정도인 것을 고려하

면, 콘크리트의 압축 강도는 최저 225 kg/cm^2 에서 360 kg/cm^2 의 범위에 든다. 이를 위 식에 대입하면 콘크리트층의 탄성계수는 최저 225000 kg/cm^2 에서 최고 284605 kg/cm^2 의 분포를 가진다.

중부고속도로와 88고속도로에서 채취한 몰드로부터 압축강도실험을 통한 탄성계수, 할선 탄성계수 측정 실험을 통한 결과를 ELCON을 이용하여 역산한 결과와 함께 표 9, 표 10에 수록하였다. 표 9와 표 10에서 알 수 있듯이 중부 고속도로의 탄성계수값이 초기 시공시의 탄성계수보다 오히려 큰 값을 나타내고 있다. 이는 코아채취시 철근의 일부가 시료에 포함되었기 때문인 것으로 판단되었다. CRCP의 경우 역산결과와 의 오차가 15%정도에 이르는 것으로 미루어 FWD를 사용한 포장의 유효 능력평가지 철근에 대해 고려하지 않을 경우 큰 오차를 발생하는 것으로 나타났다.

이에 반해 줄눈 콘크리트 포장(JCP)의 경우는 역산수행 오차가 3% 내외로서 상당히 근사한 값을 얻을수 있었

표 9. 중부 고속도로 표층의 실내 탄성계수 실험과 탄성계수 역산 결과

작용 위치 (km)	②역산 결과 (kg/cm^2)	③탄성계수 측정실험결과 (kgf/cm^2)	④압축강도를 이용한 탄성계수 계산 결과 (kgf/cm^2)	②와③의 오차 (%)	
74.05	332734	289947	285623	+14.8	
74.15	335460	291042	295664	+15.3	
74.20	305561	340256	357785	-10.2	
74.25	270887	305603	299942	-11.4	
평균	311160	306712	309753	표준 편차	15.0

표 10. 88 고속도로 표층의 실내 탄성계수 실험과 탄성계수 역산결과

작용 위치 (km)	②역산 결과 (kg/cm ²)	③탄성계수 측정실험결과 (kgf/cm ²)	④압축강도를 이용한 탄성계수 계산 결과 (kgf/cm ²)	②와③의 오차 (%)	
52.00	277051	268503	264862	+3.0	
52.10	232836	239712	242359	-2.9	
52.15	198428	194221	215337	+2.2	
52.20	231704	232570	236755	-0.4	
평균	235004	233751	239828	표준 편차	2.7

다. 따라서, 줄눈 포장의 경우 포장표층 처짐의 추정이 상당한 정도의 신뢰성을 확보할 수 있을 것으로 판단되었다.

5. 결 론

본 연구는 1994년부터 1995년까지 줄눈 및 연속철근 콘크리트 포장의 피로 실험과 FWD의 활용성 연구를 수행하였다.

1. 총 6개 시험체에 대하여 CRCP의 피로실험을 수행하였다. 먼저 재하 차량의 위치가 슬래브의 중앙에 위치할 때 피로하중의 응력수준을 16%, 40%, 48% 로 두고 피로실험을 실시하였다. 피로하중의 응력수준을 40%인 5.2t 으로 두고 피로실험을 수행한 결과 Punch Out 균열은 6,000,000회 재하에서 발생하였다. 또한 응력수준이 48%인 6.24t 일 경우 4,500,000회에서 발생하였다. 그러나 응력수준이 16%인 2.08t 의 피로하중으로 실시한 피로실험

은 피로하중재하횟수 10,000,000회 까지 가력하였으나 표면균열이 발생하지 않았다.

2. 재하위치가 슬래브의 가장자리일 때 피로하중의 응력수준을 39%, 59% 및 78%로 두었다. 피로하중의 응력수준이 39%인 3.12t 일 경우 5,000,000 회 재하시 Punch Out 균열이 발생하였다. 또한 응력수준이 59%인 4.68t 에서와 78%인 6.24t 일때 각각 2,000,000회와 500,000 회에서 Punch Out 균열이 발생하였다.

3. 본 연구에서 수행한 피로실험 결과는 교통량을 상당히 크게 평가하고 있는 것으로 알려진 1970년 Vesic 의 의해 발표된 피로수명식에 상당히 근접한 결과를 나타내고 있다. 이는 본 연구에서 수행한 피로실험이 주행차량만을 고려하여 실시한 실험실내의 피로실험이므로 교통량을 상당히 과대평가하기 때문인 것으로 판단된다.

4. FWD의 성능평가를 위하여 FWD를 이용한 현장에서 측정하여 분석한 결과와 코아채취에 의해 채취된 시료의 탄성계수 결과를 비교하였다. 줄눈 콘크리트인 88고속도로 고령구간의 경우 FWD 측정자료분석을 통하여 산출한 콘크리트의 평균 탄성계수는 실험결과 얻어진 값과 비교하여 3% 내외의 오차를 보이고 있다. 따라서 무근 콘크리트인 JCP의 경우 FWD의 역산결과가 상당히 신뢰성이 높은 것으로 판단된다. 연속철근 콘크리트포장인 중부고속도로 진천구간의 경우에는 각 측정점에서는 최대 약 15% 정도의 오차를 보이고 있다. 이는 채취한 코아에 철근이 묻혀 있어 무근 콘크리트인 JCP구간의 측정 결과보다 큰 오차를 발생한 것으로 판단된다. FWD를 이용하여 콘크리트 포장의 능력을 평가하는 방법은 적은 시간 안에 최소의 인력으로 수행할 수 있으므로 매우 편리한 포장 능력 평가 방법이다. 본 연구에서 현장측정과 실내실험을 비교한 결과 FWD는 콘크리트 포장의 합리적인 능력평가와 과학적인 도로의 유지 및 보수 관리에 효율적으로 사용될 수 있는 장비인 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 건설부, "1986 AASHTO 도로포장 구조설계 지침서", 1988.
2. 건설부, "중부고속도로 건설지", 한국도로공사, 1988.
3. 건설부, "도로포장설계지침서작성

및 자동차 축하중 조사연구", 한국건설기술연구원, 1988.

4. 김연복, 김영국, "연속철근 콘크리트 포장에서 Punchout과 철근부식을 방지하기 위한 공법 개발", 한국건설기술연구원 보고서, 1990.
5. 남영국 외, "연속철근 콘크리트포장의 균열발생 연구", 한국도로공사, 1990.
6. 김연복, 유인균 외, "우리나라 연속철근 콘크리트포장의 초기거동 및 균열패턴에 관한 연구", 한국건설기술연구원, 1993.
7. 김연복, 서영찬 외, "시멘트 콘크리트포장의 유지보수대책에 대한 연구(1단계)" 한국건설기술연구원, 1993.
8. 김연복, 서영찬 외, "시멘트 콘크리트포장의 유지보수대책에 대한 연구(2단계)" 한국건설기술연구원, 1994.
9. 한국도로공사, "CRCP거동과 균열발생에 관한 연구", 1994.
10. 한국도로공사, "도로설계요령" 제5권 포장, 1992.
11. 유인균, 김연복 외, "비파괴검사를 이용한 강성포장의 잔존수명예측 및 덧씌우기기법 개발에 관한 연구", 한국건설기술연구원, 1991.
12. 황학주 외, "시멘트 콘크리트 포장체의 응력분포에 관한 연구", 한국도로공사, 1992.
13. 한국도로공사, "건설공사 품질시험편람", 1989.
14. 건설부, "콘크리트표준시방서", 1988.