



# 콘크리트 포장 접속부에서의 포장하부강성 측정사례 분석

## Analysis of Foundation Stiffness under Widened Concrete Pavement Section

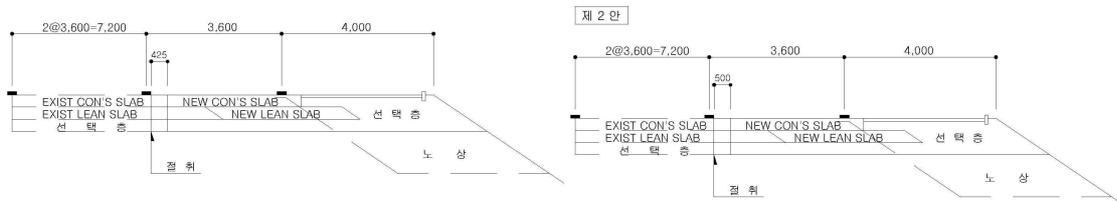
임유진\*      양성철\*\*  
 Lim, Yujin    Yang, Seong Chul

### 1. 서론

고속도로 통행 교통량의 증가로 인하여, 경부선, 호남선, 중부선, 영동선 등 대부분의 기존 노선에서 확장설계 및 시공이 이루어지고 있다. 이러한 확장공사는 신설 공사와는 달리 기존 노선의 통행과 관련하여 많은 문제를 야기한다. 특히 확장부의 노상 등 하부층 다짐관리는 기존 구간과의 연계성을 충분히 고려하여야 하는 어려움이 있다. 그리고 콘크리트포장에서 편측 및 양측 확장을 위한 접속방법은 기존 노선의 결함 보수 및 덧씌우기, 타이바 접속 등과 같은 점 등을 고려하여야 한다. 그러나 현재까지는 확장공사에서 발생하는 단차 등의 문제점에 대해 충분한 검토와 대책의 수립이 미흡한 것으로 판단된다. 따라서 본 사례연구에서는 기존 사용되는 다짐관리용 평판재하시험(PBT)과 공내재하시험(PMT)을 이용하여 확장부 및 기존포장부에서 하부기초 강성측정을 각각 시도하고 그 시험결과를 바탕으로 확장부 및 기존도로부의 강성차이의 크기발생 차이를 분석하고 이를 바탕으로 발생원인을 밝히고자 하였다.

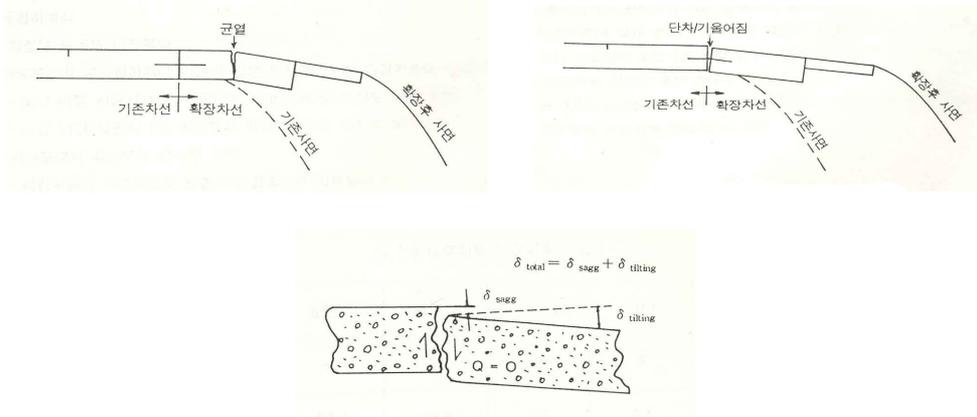
### 2. 시험대상 현장

시험 대상구간으로 경부고속도로 부산-연양간 확장공사 제 3공구 내송-구서구간 3+002~2+314 k 하행부를 선정하였다. 본 구간의 편측확장구간 표준처리방안은 <그림 1>과 같으며 확장접합부에서 발견되는 문제로는 스폐링, 단차, 벌어진, 균열 등<그림 2>을 들 수 있으므로 이를 억제하기 위한 다양한 방안이 제시되었다. 이와 같은 단차(tilting 포함), 벌어진 및 균열 등의 문제는 포장하부기초의 강성차이로 인해 발생한다고 볼 수 있으며 강성차이를 유발시키는 원인을 시험을 통해 분석하였다.



<그림 1> 부산-연양간 확장부 표준 처리방안

\* 정회원 · 배재대학교 건설환경공학과 부교수 · 공학박사 · 042-520-5402 (E-mail : yujin@pcu.ac.kr)  
 \*\* 정회원 · 홍익대학교 건축공학부 부교수 · 공학박사



〈그림 2〉 기존 차선과 확장차선 접합부에서 발견되는 문제

확장시 부등침하의 일반적인 원인에는 통상 확장부지반의 지지력부족, 확장부 토공의 다짐불량, 기존도로와 확장부의 접속부 취약, 초기침하가 완료되지 않은 상태에서 포장시공, 포장체의 균열을 통한 침투수 유입 등을 들 수 있으며 각 원인의 유발요인은 〈표 1〉과 같이 정리해 볼 수 있다. 〈표 2〉(장명순외, 1995)는 도로성토부의 붕괴 원인을 비교한 것이며 대부분 표면수나 침투수에 기인하는 것을 알 수 있다.

〈표 1〉 확장시 부등침하 발생원인의 유발요인

확장시 부등침하 발생원인	유발 요인
확장부지반의 지지력부족	<ul style="list-style-type: none"> <li>•연약지반, 불량토 원지반의 치환 /미충분 성토 처리</li> </ul>
확장부 토공의 다짐불량	<ul style="list-style-type: none"> <li>•성토재료의 부적합</li> <li>•노체 및 노상 다짐기준에 미달하는 경우</li> <li>-노체 1층 다짐두께 30 cm 이하 /다짐도 90 % 기준 미달</li> <li>-노상 1층 다짐두께 20 cm 이하 /다짐도 95 % 기준 미달</li> </ul>
기존도로와 확장부의 접속부 취약	<ul style="list-style-type: none"> <li>•다짐시공중 기존도로의 표면수가 접속부로 침투되어 다짐불량으로 이어지는 경우</li> <li>•기존 토공(층따기)과 확장부 토공사이의 경계면에서 다짐이 불충분한 경우</li> </ul>
초기침하 미완료상태의 포장시공	<ul style="list-style-type: none"> <li>•다짐기준 적합 성토구간도 약간의 초기침하가 예상</li> <li>•공기에 쫓겨 초기침하완료전에 포장시공</li> </ul>
포장체의 균열을 통한 침투수유입	<ul style="list-style-type: none"> <li>•유입수 배수처리설계 불량</li> </ul>

〈표 2〉 도로성토의 붕괴원인비교

붕괴원인	표면수	침투수	기초지반	기타	계
조사개소	62	22	3	5	92
비율(%)	67.4	23.9	3.3	5.4	100



도로성토부의 붕괴는 상층포장의 균열 및 단차, 벌어진 발생의 또 다른 원인이 되며 <그림 3>은 이와 같은 균열발생에 따른 콘크리트 포장의 전단면 보수 예를 도시한 것이다.



<그림 3> 균열발생으로 인한 전단면 보수의 예

<그림 4>는 시험 대상인 부산-연양 현장의 확장부 포장전과 콘크리트 포장시공에 따른 최종 마무리처리 직후의 모습을 비교한 것으로서 공내재하시험 및 평판재하시험은 포장시공전 보조기층의 마무리 물러다짐 직후에 실시하였다.



<그림 4> 시험대상 구간 확장부 포장전후의 비교

### 3. 재하시험을 이용한 확장부 접속구간의 지지력 평가방법

확장부에서는 기존 포장과 신설포장 아래 포장 하부기초의 다짐도 차이가 유발될 수 있다. 다짐도의 차이는 재료의 강성차이를 유발하며 이로 인해 확장포장된 구간으로의 교통개방시 주행횟수가 반복됨에 따라 부등침하와 벌어진 등의 문제를 발생시킬 수 있다. 이와 같은 확장부 포장하부기초의 강성을 평가하는 방법으로서는 평판재하시험(PBT; Plate Bearing Test), FWD(Falling Weight Deflectometer) 및 공내재하시험(PMT; Pressuremeter Test), 동적콘관 입시험(DCPT; Dynamic Cone Penetration Test) 등이 사용될 수 있다. 이중 FWD는 상대적으로 고가인 시험장비를 사용하여야 하고 운용 및 해석방법이 어려워 현장기술자의 이해를 구하기가 곤란하다는 단점이 있다. 또한 비파괴시험(NDT)인 관계로 공학적 측면에서의 응력-변형을 관계에 입각한 강성도(Stiffness)의 평가가 모호하다는 점도 본 방법



의 취약점이라 할 수 있다. 반면 평판재하시험과 공내재하시험은 현장의 지표면 또는 포장하부층 내에 직접 압력을 가하여 응력-변형을 관계에 입각한 수직지반반력계수 또는 탄성계수를 구할 수 있는 장점이 있고 상대적으로 값싼 장비와 적은 운용인력이 필요하며 구동방법 또한 매우 용이하다.

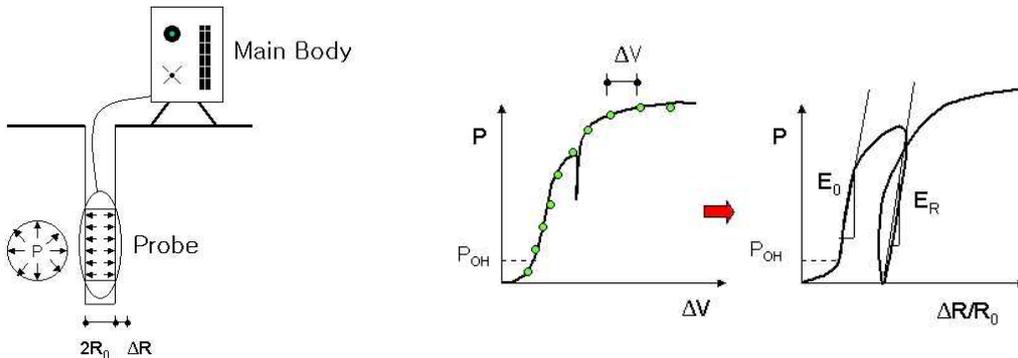
### 3.1 평판재하시험

이 시험은 직경 300, 400 또는 750 mm의 강재원판을 다짐 마무리면에 거치하고 하중을 가하여 하중강도(p)와 침하량(s)의 상관 그래프를 구하여 일정 침하량에 해당하는 하중강도값 즉, 수직지반반력계수(k) (식 1)를 구하는 것이다. 따라서 지반지지력계수(k)의 단위는  $\text{kgf/cm}^2$  또는  $\text{kN/m}^3$  가 되며 포장인 경우 하중강도(p)-침하량(s) 그래프 상에서 1.25 mm 침하량에 해당하는 값으로 취한다.

$$k = \frac{p}{s} \tag{1}$$

### 3.2 공내재하시험(Pressuremeter Test)

공내재하시험은 원주형의 프로브(probe)를 시험대상 지반내의 천공경 안에 거치하고 이를 횡방향으로 가압시키는 장치로서 시험시 가한 횡방향 압력(p)과 프로브의 부피팽창( $\Delta V$ )을 측정하여 이들의 관계로부터 현장지반의 횡방향 가압력(p)-횡방향 변형률( $\Delta R/R_0$ ) 관계를 설정할 수 있다. 횡방향 변형률( $\Delta R/R_0$ )은 공경의 팽창변형을 초기반경( $R_0$ )에 대한 공경의 증가( $\Delta R$ )비로 표시한 것으로서 반경방향의 변형율( $\epsilon_{\theta}$ )이 되며 <그림 5>는 전형적인 PMT시험 결과를 도시한 것으로서 부피팽창( $\Delta V$ )으로부터 횡방향 변형율로 변환하는 과정과 측정된 원데이터로부터 얻을 수 있는 탄성계수( $E_0$ ,  $E_R$ )를 설명한다.



<그림 5> 공내재하시험기의 작동원리 개략도

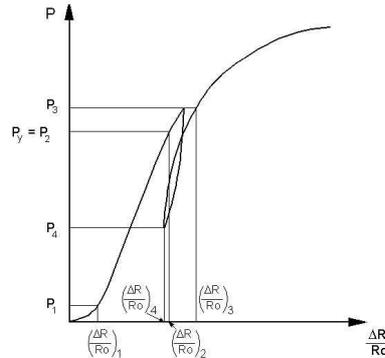
위의 그림에서 지반의 탄성계수는 아래와 같이 정의된다.

$$E_{elastic} = 2(1 + \nu) V \frac{p}{\Delta V} \tag{2}$$

식 (3)은 시험그래프의 제하-재재하 부분을 이용한 탄성계수(ER) 계산식이다.<그림 6>



$$E_o = (1 + \nu)(p_3 - p_4) \frac{\left[1 + \left(\frac{\Delta R}{R_o}\right)_3\right]^2 + \left[1 + \left(\frac{\Delta R}{R_o}\right)_4\right]^2}{\left[1 + \left(\frac{\Delta R}{R_o}\right)_3\right]^2 - \left[1 + \left(\frac{\Delta R}{R_o}\right)_4\right]^2} \quad (3)$$



〈그림 6〉 PMT 시험결과를 이용한 탄성계수의 정의 방법

임유진 등 (2004)은 공내재하시험을 이용하여 포장하부기초의 강성도를 파악하는 기법을 제시한 바 있다. 포장하부 구조를 구성하는 노상 및 보조기층 재료의 변형률 의존성과 응력의존성 및 재하속도와 재하횟수의 영향을 고려하여 탄성계수를 계산할 수 있는 산정식을 아래와 같이 제시한 바 있다.

$$E = \frac{1}{\frac{1}{K} \left(\frac{P}{P_a}\right)^{-n_s} + b} \left(\frac{t_1}{t_o}\right)^{-n_t} N^{-n_c} \quad (4)$$

위의 식을 사용하기 위해서는 특별히 고안된 PMT시험 절차로부터 시험 파라미터 K,  $n_s$ , b,  $n_t$ ,  $n_c$ 를 구하여야 한다. 여기서, 각 시험 파라미터를 구하는 방법은 임유진 등(2004)에 상세히 기술되어 있다.

## 4. 현장시험 및 시험결과 해석

### 4.1 현장시험 구간의 상황 및 시험준비

시험대상인 확장부는 기존 콘크리트 포장의 노면(길어깨)에 해당하는 부위가 3차에 걸쳐 덧씌우기 되어 있는 상태이다. 따라서 접속부의 기존구간과 신설포장구간에 대한, 동일한 상태에서의 지반강성 또는 다짐도를 비교, 평가하기 위해 접속부 기존 포장 상층부를 사방 1 m 씩 정사각형 모양으로 절단, 제거한 후 평판재하시험 및 공내재하시험을 각각 실시하였다.

제거된 부분은 마무리 면의 평탄성을 확보하기 위해 소형 다짐기로 다짐을 실시하였다. 시험대상구간 공구내 시험구역을 〈표 1〉과 같이 총 5개소로 구분하였다. 선정된 시험대상지는 전체 확장부중 순성토부, 절성경계부, 뒷채움부 및 절토부로 구분하여 토공방법 차이 즉, 원지반 또는 순성토에 등에 따른 지반강성의 차이가 포장확장부 거동에 미치는 영향을 평가하도록 하였다. 지내력 시험 및 계측기 설치의 자세한 위치는 〈그림 7〉에 도식화하였으며 신설 확장포장 3차로와 확장 접속부 위치에서는 평판재하시험과 공내재하시험을 모두 실시하였으나 기존 본선 1차로에서는



공내재하시험만 수행하였다. 절단된 기존 포장부의 하부포장층은 상당히 습윤한 상태를 보였다.

아울러 기존 콘크리트 슬래브와 확장 콘크리트의 상대거동을 알아보기 위하여 변위계를 설치하여 두 슬래브간의 벌어짐, 밀림, 단차를 측정하였다. 아울러 기존구간의 포장상태를 조사하였으며 코어시편의 강도시험을 통해 기존포장부의 상태를 평가하였다.

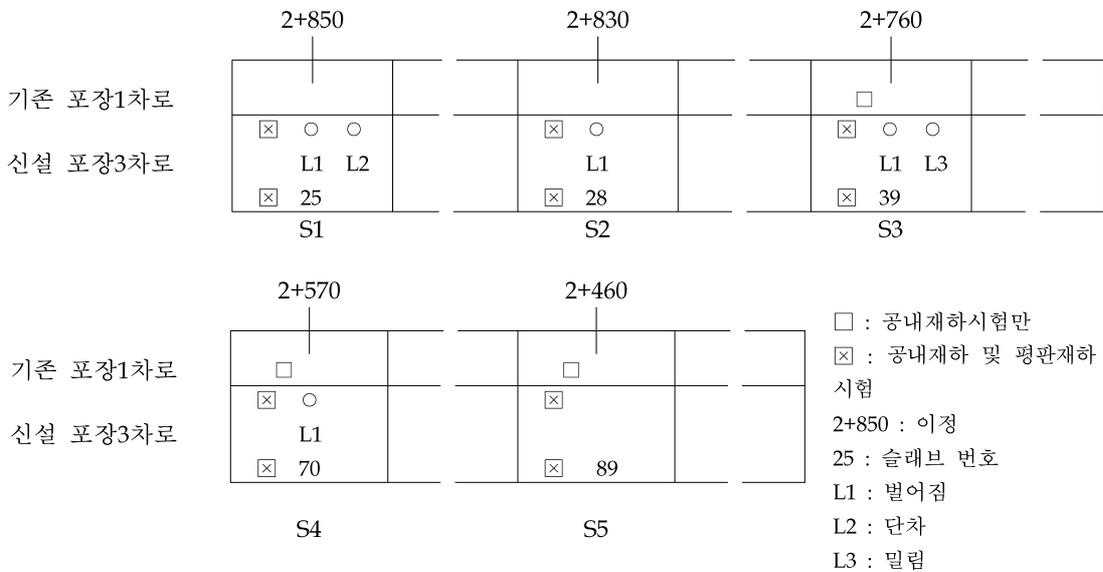
〈표 3〉 확장공사 구간내 시험대상 구역의 구분

시험구역 구분 번호	이정(서울기점하행)	슬래브번호	비 고
1 : (1-1, 1-2)	2+850	25	절토부
2 : (2-1, 2-2)	2+830	28	절성경계부 근접 - 성토고 2.5m
3 : (3-1, 3-2)	2+760	39	수로박스 뒷채움부 - 성토고5m
4 : (4-1, 4-2)	2+570	70	순성토부 - 성토고5m
5 : (5-1, 5-2)	2+460	89	절성경계부 - 성토고 "0" m

N.B) 1, 2, 3, 4, 5번: 신설구간

1-1, 2-1, 3-1, 4-1, 5-1: 기존 구간 포장부 (부산방향 노견측)

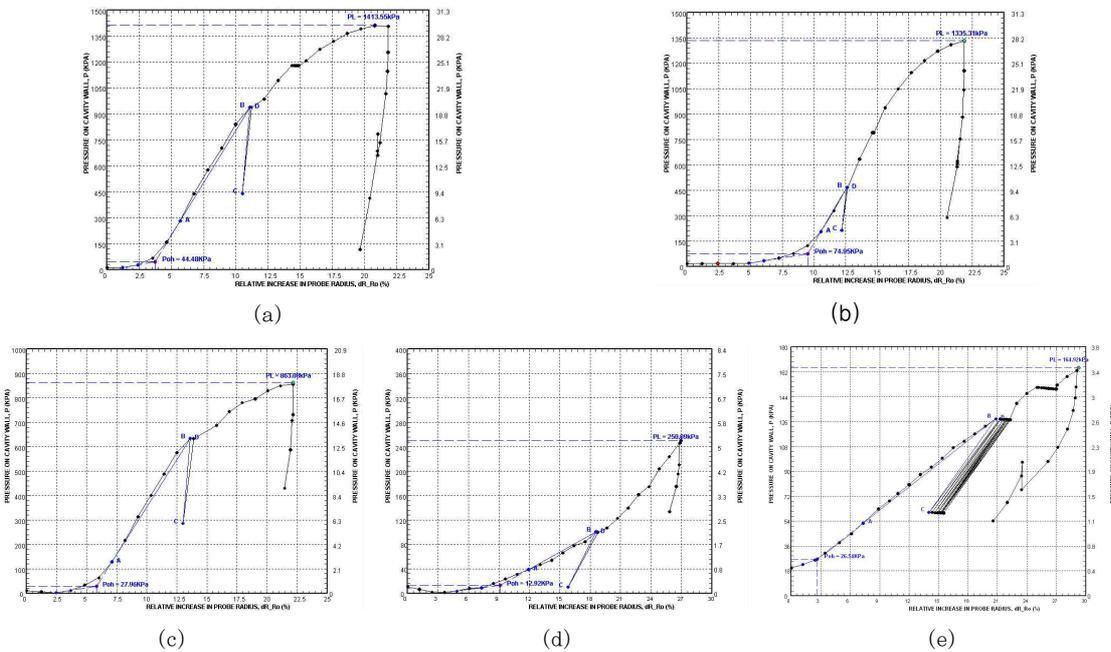
1-2, 2-2, 3-2, 4-2, 5-2: 기존 구간 포장부 (서울방향 본선 콘크리트 포장부)



〈그림 7〉 지내력시험 및 계측기의 설치위치

#### 4.2 현장시험 및 결과의 분석

〈그림 8〉은 시험대상 구간의 대표 공내재하시험 결과중 일부를 도시한 것이다. 기존부에서는 공벽의 느슨함으로 인하여 상대적으로 변형이 크게 발생하였으며 탄성계수가 작은 경향을 확인할 수 있었다.



〈그림 8〉 공내재하시험 결과의 예 : (a) 신설확장부 (시험연번 2: 2+830 지점), (b)기존포장부 (시험연번 2-1: 2+830 지점), (c)신설확장부 (시험연번 5: 2+460 지점), (d)기존부 (시험연번 5-1: 2+460 지점), (e)기존부 (시험연번 5-2: 2+460 지점)

〈표 4〉는 현장시험에 획득된 시험결과를 시험구역별로 정리한 것이다. 평판재하시험(PBT)의 경우 기존 포장구간의 하부포장층이 신설 포장부 다짐구간에 비해 크게 작은 값을 보였으며 이는 시험시 기존 포장하부층이 습윤상태인 것으로 관찰된 바 표면수의 균열부 침투 및 편절토부의 지하침투수의 침입으로 인한 포장 하부 지반지력 약화현상인 것으로 판단된다. 신설확장부의 경우 절토부 또는 성토부에 따른 수직지력계수( $k_{30}$ )의 차이는 없는 것으로 보이나 기존 포장부와 비교하였을 때 약 2배 가까운 큰 값을 보였다. 특히 성토고가 "0"인 #5 및 #5-1 구간은 포장하부층을 원지반 위에 직접 포설한 것으로서 평판재하시험결과 값의 차이가 거의 없는 것으로 계산되었다.

공내재하시험(PMT)의 경우 초기탄성계수( $E_0$ )와 제하-재재하부 탄성계수(ER)를 비교하였다. 초기탄성계수( $E_0$ )의 경우 #1, #4, #5 구간에서 신설확장부에 비해 기존구간이 상대적으로 작은 값을 보였다. 이는 평판재하시험의 결과와 일치하는 것이다. 특히 #4 및 #5 구간은 기존포장부가 신설확장부에 비해 크게 작은 초기 탄성계수값을 보였으며 매우 큰 방사방향 변형을 보였다. 이는 콘크리트 본 포장구간에서도 확인되었다. 평판재하시험과 공내재하시험 결과를 요약하면 다음과 같이 정리할 수 있으며 이는 특정 현장에 국한된 내용이므로 보편적으로 적용할 수 없음에 유의할 필요가 있다.

- (1) 신설구간의 강성이 기존 접속부 및 본 콘크리트 포장부 보다 크게 측정되었으며 그 이유는 장기간 공용에 따른 기존부포장의 내구성 저하와 침투수의 침윤으로 인한 강성저하로 판명된다. (제하-재재하 탄성계수 ER중심으로 해석)
- (2) 접속부 보다는 본 콘크리트 포장부의 강성이 더 작게 측정되었다. (제하-재재하 탄성계수 ER중심으로 해석)
- (3) 종단방향의 비교 : 성토부(절성경계부 및 뒷채움부)가 절토부보다 강성이 크게 측정됨. 이는 절토부에서 흔히 관측되는 지표수의 침투 또는 지하수의 용출에 의한 영향으로 판단되었다.



(표 4) 평판재하시험(PBT) 및 공내재하시험(PMT) 결과 비교표

시험구역 구분 번호	이 정 (서울기점하행)	PBT		PMT		슬래브 번호	비 고
		k30 (kg/cm3)	E0 (kPa)	ER (kPa)			
1 1-1	2+850	37.88 18.48	1464.23 1271.45	6840.31 5012.25	25	절토부	
2 2-1	2+830	35.0 19.68	1644.62 2150.66	13970.49 11597.47	28	절성경계부 근접 -성토고 2.5m	
3 3-1 3-2	2+760	33.84 20.0	1938.05 2226.12 2026.76	22717.32 15990.77 9366.36	39	수로박스 뒷채움부 -성토고5m	
4 4-1 4-2	2+570	37.32 25.6	1268.45 229.98 301.36	11032.06 1872.02 1388.14	70	순성토부 -성토고5m	
5 5-1 5-2	2+460	31.72 30.64	1269.56 209.19 134.47	11032.06 801.9 251.86	89	절성경계부 -성토고 "0" m	

## 5. 결 론

기존 도로의 확포장시 포장하부구조의 강성차이로 인해 발생하는 단차, 벌어짐, 균열 등은 도로의 주행안정성과 승차감 저하의 주요 요인이 된다. 본 사례분석에서는 포장하부구조의 강성차이가 발생할 수 있는 원인을 분석하였으며 공내재하시험과 평판재하시험을 이용하여 확장구간의 기존 도로와 신설부 및 접속부에서 포장하부구조의 강성을 탄성 계수 및 수직지반반력계수를 기반으로 조사하였다. 조사결과, 기존 도로부 특히 절토부 원지반에서의 장기공용에 의한 강성저하가 확인되었으며 주요 원인으로는 침투수의 체외배출 불량이 지적되었다. 따라서 확포장시 기존부와 접속부 및 신설부의 다짐도를 최적화시키는 기술이 개발되어야 할 것으로 판단되었다.

### 감사의 글

본 연구는 건설교통부의 2008년 '스마트하이웨이 사업단 핵심 1연구 분야 3세부과제(스마트 pavement 설계기술개발)'의 일환으로 연구 수행되었으며 해당 기관의 지원에 감사드립니다.

### 참고문헌

한국도로공사 경부고속도로(연양-부산간) 확장공사실시설계 일반보고서-제3공구:내송-구서, 한국도로공사  
 한국도로공사 (2003), "고속도로공사 표준도"  
 임유진, 누엔티엔하이, 장덕순(2004) "공내재하시험에 의한 포장하부기초 강성도 평가", 한국도로학회논문집, 제6권, 제2호, pp25~36  
 장명순 외(1995) "고속도로 확장에 관한 설계기준 작성 연구", 한국도로공사