

도로의 단차발생과 대책 방안



임 유 진 | 정회원 · 배재대학교 건설환경공학과 부교수
 최 영 철 | 비회원 · 한국도로공사 도로교통연구원 책임연구원
 이 흥 수 | 비회원 · (주)한맥기술 기술연구소 실장

1. 서론

일반적으로 교대(bridge abutment) 등의 도로구조는 도로포장부와 교량과 같은 구조물부 사이의 접속부 또는 완충부를 연결하는 역할을 담당한다. 따라서 서로 이질적인 강성 등 재료물성과 강도차이로 인하여 비균질한 변형을 초래하고 이로 인하여 포장표면에서 단차를 발생(그림 1)시키는 원인이 된다. 단차가 발생하는 이와 같은 구간을 통칭 불연속구간이라 하며 노면 불연속 구간에서의 단차발생은 포장의 파손과 승차감의 저하 및 사고의 유발까지 초래할 수 있다. 노면 불연속 구간은 크게 교량 접속부와 포장 접속부로 구분할 수 있다. 교량 접속부에서의 가장 큰 문제점은 구조물 뒤채움부의 침하로 인한 단차이며, 승차감의 저하에 큰 영향을 미친다. 포장 접속부에서의 가장 큰 문제점은 종방향 이음부의 콜드 조인트에서 발생하는 종방향 균열이다. 콜드 조인트의 다짐밀도 부족에서 발생하는 종방향 균열은 포장파손의 원인이 되고 있다.



그림 1. 전형적인 교대 접속부에서의 단차발생 예

교대 및 통로박스과 같은 구조물의 뒤채움부는 강성이 커서 비교적 변형이 작게 발생하는 구조물과 변형(침하) 발생 가능성이 이 보다 큰 뒤채움 토공부분의 두 이질부의 접합부로서 구조적으로 불연속면이 발생할 수밖에 없다. 두 재료의 강성차는 상대적인 변형발생의 차이를 초래하고 이로 인해 포장상부에서의 평탄성 저하를 초래한다. 한편 국내에서는 교대 뒤채움 재료로서 보조기층급인 양질의 SB-1

입상재료를 선택하여 사용하고 있으며 단차발생으로 인한 평탄성의 저하를 방지하기 위한 대책으로써 뒤채움 상부에 접속슬래브를 설치하고 있다. 그러나 이러한 노력에도 불구하고 교대 접속부에서 발생하는 단차와 이로 인한 노면 평탄성과 주행성의 저하가 여전히 문제점으로 지적되고 있다. 경제발전과 생활수준의 향상에 따라 쾌적한 주행성 확보에 대한 요구가 점점 더 높아지고 있으며 이를 위하여 교량 접속부에서의 평탄성을 확보하기 위한 종합적인 대책수립이 필요하다.



그림 2. 교대부에서의 단차발생 원인

2. 교량접속부에서 발생하는 문제의 원인과 처방

도로구조물부 단차의 발생원인은 크게 아래와 같이 정리할 수 있다.

- (1) 성토체 기초지반(원지반)의 시간의존성 압밀 침하
- (2) 접속슬래브 하단부 성토체의 시간의존성 압밀 침하
- (3) 교대 뒷채움부의 다짐부족으로 인한 뒷채움부의 침하
- (4) 교대배면에서의 뒷채움도 침식
- (5) 뒷채움부에서의 배수불량

이와 같이 도로구조물 및 교대접속부 등에서 발생하는 단차발생의 제일 원인은 교통하중 및 침투수의 침식, 하부원지반 기초의 연약함 등으로 인한 접속슬래브 하부 뒷채움재료의 변형, 성토체의 침하 등으로 요약해 볼 수 있다. 이중 도로구조물인 교대부에서의 단차발생 원인을 축약하여 그림 2와 같이 정리할 수 있다.

반면 국내에서는 난장이 교대와 무조인트(jointless)교량을 채택하는 미국 등의 경우와는 달리 현재까지는 대부분 완형(full size)의 교대를 사용하는 경우가 많으므로 이에 대해 관련 문제를 정리하면 그림 3과 같으며, 지반공학적 단차발생 원인이 되는 압밀현상을 제외하고 단차발생 원인을 체계적으로 분류하면 다음과 같다.

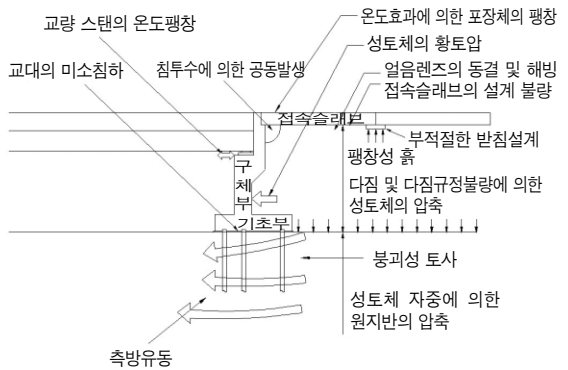


그림 3. 완형(full size) 교대에서의 단차발생 원인

(1) 뒤채움부 재료의 다짐불량

접속슬래브 하단의 성토체와 뒷채움부의 침하는 장기간에 걸쳐 발생하며 부적절한 재료의 선택과 다

짐볼량으로 인해 발생한다. 즉, 다짐에너지의 부족은 낮은 다짐밀도를 초래하고 이로 인하여 성토체의 잠재 변형량이 커지게 된다. 다짐볼량은 교대 접속슬래브 하단과 교대 배면으로 이루어지는 좁은 공간에서 다짐장비의 운용공간부족으로 인해 발생할 가능성이 크다. 다짐공간의 부족은 보다 작은 다짐장비의 반입을 고려하게 되고 이는 다짐에너지의 부족을 초래한다.

(2) 침투수의 침투와 배수불량

교대배면부로 침투된 물과 접속슬래브 하단부 즉, 뒷채움부로 침투하는 물은 성토체 구성재료 및 뒷채움재료의 침식(erosion)을 초래할 수 있다. 이와 같은 침식현상은 상부에 놓인 접속슬래브의 침하를 초래할 수 있다. 또한 동상발생이 예상되는 뒷채움재료는 배수 불량으로 인한 물의 침투시 체외로 배출되지 않고 동절기와 해빙기에 동상과 해빙의 반복발생으로 인하여 상부포장 또는 구조물의 침하를 초래할 수 있다.

(3) 접속슬래브의 구조적 원인

접속슬래브의 설계불량 또한 단차발생의 원인으로 지목될 수 있다. 설계불량은 접속슬래브의 균열을 초래할 수 있으며 미국의 경우 접속슬래브와 완충슬래브 접속부에 받침구조물로 사용하는 받침슬래브의 유효한 크기설계가 불합리할 경우 구조적인 문제를 일으켜 침하를 발생시킬 수도 있음이 지적된 바 있다. 반면 국내에서는 받침슬래브의 사용에 대한 정확한 시방규정이 없는 실정이다. 특히 최근 국내에 도입되어 시공된 바 있는 일체식 및 반일체식 교량의 경우, 온도에 따른 상판의 신축으로 인해 접속슬래브에서의 단차발생을 초래할 수 있다.

Briaud 등 (1997)은 미국내 48개주의 교량을 분석한 후 단차가 발생하는 주요원인과 그 발생순위를 표 1과 같이 정리하였다.

표 1. 단차발생 주요원인 및 발생순위

발생순위	단차발생 원인
1	압축성 원지반상 성토
2	짧은 접속슬래브
3	뒷채움재료 불량
4	압축성 뒷채움재료
5	고성토 (10m 이상)
6	배수불량
7	침식
8	조인트 설계불량 및 유지관리 불량

2.1 침식에 의한 단차발생과 침식가능성에 대한 검토

불량한 뒷채움재와 성토재료는 장기간에 걸쳐 침하를 발생시키며 아울러 침투된 물에 대한 저항이 작아서 침식에 노출될 가능성이 크다. Briaud 등 (1997)은 침식에 저항할 수 있는 흙재료의 입도분포와 침식이 일어나기 쉬운 입도분포를 제시한 바 있다 (그림 4). 이에 의하면 성토체 또는 뒷채움토의 침식에 대한 적절한 표면보호공이 없을 경우 사질토와 실트 사이에 있는 입경폭(band)의 모든 흙재료가 침식이 될 수 있다. 따라서 침투된 물의 신속한 배수를 위한 효과적인 배수시스템과 침투 자체를 방지하기 위한 보호공의 적절한 설계와 시공이 필요하다. 따라서 배수기층의 도입과 뒷채움재료의 침식가능성에 대한 검토를 통해 포장하부재료에 대한 새로

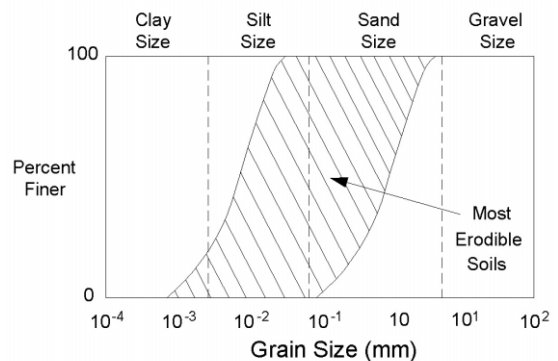


그림 4. 침식이 일어나기 쉬운 입도분포

운 선택기준이 필요하다.

그림 5는 Briaud 등(1997)에 의해 제시된 침식 발생이 가능한 입도분포 중 상한입도분포를 국내 SB1 및 SB2 등의 뒷채움재료 입도분포와 대비하여 도시한 것이다. 그림 상으로 AASHTO 분류기준 A-1-a 재료는 침식에 대한 저항성이 매우 크고 타 재료에 비하여 우수한 것으로 판단된다. AASHTO A-1-b 재료는 침식에 대한 분류기준으로는 적합하지 않은 것으로 구분된다. 또한 A-3재료의 경우 침식저항기준에는 적합할 수 있으나 입도분포가 좋지 않으므로 성토체 재료로 사용할 수 있다. 그러나 뒷채움 재료로서는 적합하지 않음을 알 수 있다. 국내 보조기층재료(SB1 및 SB2)는 모두 Briaud(1997)에 의해 제시된 침식가능 영역대비 양호한 침식저항을 보일 것으로 예상되지만 일부 미세립자가 포함되는 부분에서는 AASHTO 분류기준으로 A-1-a 또는 A-1-b에 속할 수 있으므로 침식기준으로 분류할 때

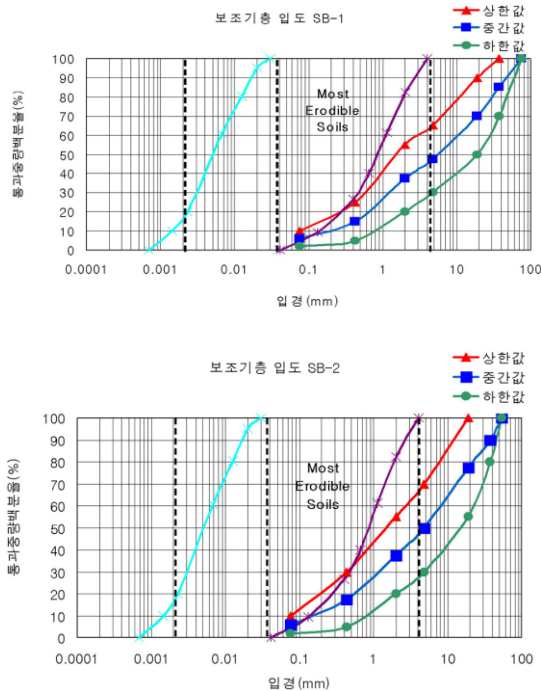


그림 5. 침식발생 가능성의 국내 SB1 및 SB2 뒷채움재료에 대한 검토

모호한 측면이 있음을 알 수 있다.

그림 6은 국내 도로공사표준시방서(한국도로교통협회, 2005)에 규정한 노상토의 입도사용기준을 Briaud(1997)가 제시한 침식가능 입도분포와 비교하여 도시한 것이다. 국내 입도분포기준이 200번체(0.075mm) 통과비율을 0~25%까지 크게 규정함으로써 세립성 재료가 많이 포함될 여지를 남겨두어 침식가능한 입도영역이 커짐을 알 수 있다. 따라서 입도에 대한 재규정 뿐만 아니라 침투된 물을 신속히 배출시킬 수 있는 배수설계가 필요함을 알 수 있다.

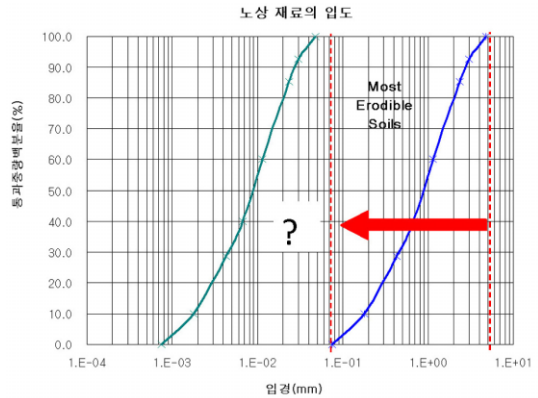


그림 6. 국내 노상재료의 침식가능성 비교

2.2 접속슬래브에서의 단차발생

표 1에 정리한 단차발생 주요 원인 중 두 번째는 짧은 접속슬래브로서, 대부분의 미국 주도도로국(State DOT)으로부터 단차발생의 핵심 원인 중 하나로 지목된 바 있다. 초기 접속슬래브와 동일 레벨로 교량스팬과 교대 및 도로포장면이 시공되었다고 가정하였을 경우 접속슬래브의 기울기는 아래 식으로 표현된다.

$$S = \frac{s_f - s_a}{L} \quad (1)$$

여기서, S = 접속슬래브의 기울기, L = 접속슬래브 길이, s_f = 원지반 기초(성토체 및 원지반)의 침하량, s_a = 교대의 침하량

접속슬래브의 기울기에 대한 연구중 Start 등 (1995)은 슬래브의 기울기가 1/100~1/125이면 상당한 주행승차감의 불편을 초래한다고 지적한 바 있으며, 이는 Wahls(1990)가 제안한 허용 기울기인 1/200에 근접한다고 볼 수 있다.

적절히 설계된 교대의 경우 단차발생이 미소하여 무시할 수 있으므로 접속슬래브의 기울기(S)는 원지반기초의 침하(s_f)와 접속슬래브의 길이(L)와 만이 상관된다고 할 수 있다. 주행중 차량 및 운전자에게 충격을 주는 것은 차량이 접속슬래브를 통과할 때의 접속슬래브 기울기(S) 자체가 아니라 기울기의 변화를 또는 곡률(curvature)로 볼 수 있다. 포장표면과 교량스팬이 동일 수준(level)으로 가정되는 가장 단순한 경우, 접속슬래브의 곡률은 식 (1)에서 정의된 기울기와 같다. 따라서 접속슬래브의 길이가 줄어들 경우 접속슬래브의 기울기(경사)는 증가하여 더 심각한 단차발생을 초래한다. 그러므로 접속부에서 단차발생을 줄일 수 있는 효과적인 방법으로 접속슬래브의 길이를 증가시키는 방안이 고려될 필요가 있다. 따라서 도로접속부에서의 단차허용 기준은, 단차발생량 자체의 허용값(δ_{allow})과 더불어 접속슬래브의 기울기(S_{allow}) 또는 곡률기준으로도 설정될 필요가 있다.

2.3 단차발생 기타 원인

표 1에서 보면 단차발생의 다섯 번째 원인으로서는 고성토가 지적되고 있다. 고성토는 충분한 다짐이 이루어지지 않을 경우 다짐재료의 변형으로 인한 침하가 발생할 소지가 더 크다고 할 수 있다. 최근 국내에서는 선형개량추세에 따라 고성토가 빈번하게 발생하나 공학적인 측면을 고려한 면밀한 설계요령이 별도로 제시되어 있지 않은 상태이다.

또 다른 단차발생의 원인으로서 교대에 작용하는 수평력을 들 수 있으며 수평력은 주로 뒷채움토에 의한 수평토압과 포장체의 종방향팽창에 의해 발생한다. 미국의 사례조사에 따르면 주로 콘크리트

포장의 접속슬래브에서 이와 같은 포장의 종방향 팽창에 의한 접속부 평탄성의 저하가 보고된 바 있다 (James 등, 1991).

접속슬래브 하단에 발생하는 공동은 또 다른 접속부의 침하를 초래한다. 미국의 경우 일체식교량 하단에서 교량스팬의 열팽창으로 인해 발생(Schaefer and Koch, 1992)하거나 침투수에 의한 배수불량과 이로 인한 침식에 의한 것으로 보고(Hearn, 1995)된 바 있다.

3. 단차발생에 대한 대책

3.1 단차저감 설계안

(1) 단차저감 설계를 위한 기본 침하량 계산 및 최소 슬래브 길이 타당성 검토

단차는 기본적으로 포장을 지지하는 성토체 또는 원지반의 지지력부족과 구성재료의 변형에 기인한다. 따라서 교량접속부를 구성하는 뒷채움부와 성토체 및 원지반기초를 포함한 모든 지반구성물질로 구성된 부위의 침하분석(settlement analysis)을 실시해야 한다. 이와 같은 침하분석은 장기간에 걸쳐 발생하는 접속부침하의 예측이 가능하도록 한다.

침하계산 결과값을 이용하여 접속슬래브의 길이가 아래 식으로 규정된 값 이상이 되도록 제시(Briaud, 1997)된 바 있다. 즉, 안정적인 접속슬래브에서의 주행안정성과 평탄성을 확보하기 위해서는, 교대자체의 침하량(s_a)이 미미하다고 가정할 경우, 접속슬래브 길이(L)는 원지반기초의 침하량(s_f)의 최소 200배 이상이 되어야 함을 의미한다.

$$L \geq 200(s_f - s_a) \quad (2)$$

(2) 단차저감설계를 위한 실무방안

국내에서는 단차발생 억제를 위하여 현재까지는 그림 7과 같이 단순하게 절성경계부에 보강슬래브를

설치하거나 그림 8과 같이 포장부와 접속슬래브 사이에 완충슬래브를 연장, 설치하고 있다. 그러나 이와 같은 방안은 교대 등 구조물과 성토체, 원지반 및 포장체 등 이질적인 구조체의 서로 다른 강성을 고려한 접속부에서의 종합적인 변형해석 및 구조해석에 근거한 것이 아님에 유의할 필요가 있다. 따라서 단차의 발생을 억제하기 위해서는 이들을 종합적으로 고려한 변형해석과 구조해석에 근거한 새로운 접속슬래브의 형태 및 다양한 설계방안이 제시되어야 한다.

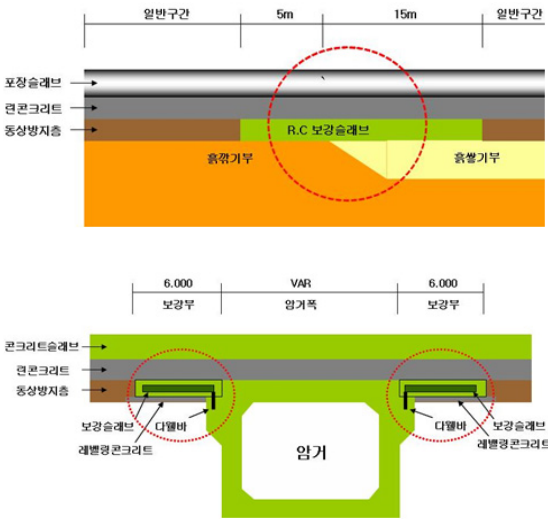


그림 7. 보강슬래브의 설치

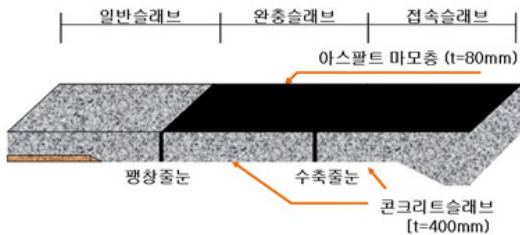


그림 8. 완충슬래브의 설치

미국의 경우 접속슬래브 위치에서의 다양한 단차저감 설계안이 제시되고 있다. 미국 루이지애나 주의 뉴올리안즈 공항에서는 마찰말뚝을 이용하여 접속슬

래브의 단차저감기술이 적용된 바 있다(그림 9). 이때 교대지지말뚝은 암반과 같은 확실한 지지층에 거치시키고 접속슬래브의 교대방향으로 마찰말뚝의 길이를 증가시켜 교대와 접속슬래브 접속위치에서의 단차가 최소한이 되도록 하여 장기간 공용 후 성토부에서의 침하가 오히려 접속슬래브 직하부에서의 침하량보다 더 적게 발생하도록 설계하였음을 알 수 있다. 이는 앞서 지적한 바와 같이 슬래브의 종방향 기울기가 정(+)이 되도록 미연에 조치한 것이다.

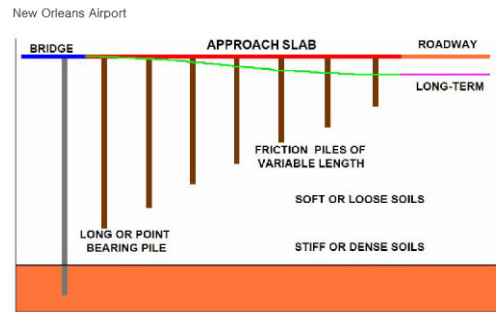


그림 9. 마찰말뚝을 이용한 접속슬래브의 단차저감 방법

Briaud 등(1997)은 침투수에 의한 접속슬래브 하단부 침식과 이로 인한 공동발생을 억제하기 위한 방법으로서 그림 10과 같이 날개벽의 설계를 수정하는 방안을 제시하였다. 즉, 날개벽을 포장상부와 포장하부로 구분하여 표층수가 포장하부지반 내로 침투하지 않도록 설계를 변경, 제시한 것이다.

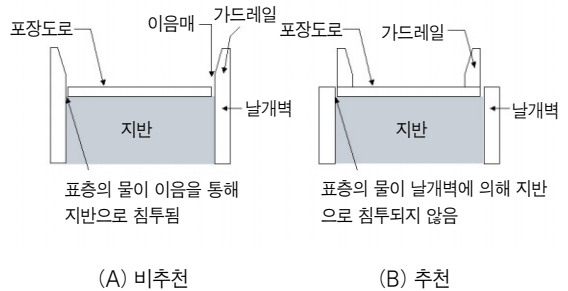


그림 10. 접속슬래브 하단부 침식과 공동발생 억제를 위한 날개벽의 설계방법

“ㄱ”자 형태의 앵커슬래브를 접속슬래브와 포장 사이에 설치하여 접속슬래브와 포장부 사이의 침하를 감소시킬 수 있다(그림 11). 이때 앵커슬래브는 완층슬래브를 대신하며 앵커블록으로 횡방향 토압에 저항하며 아울러 마찰말뚝의 기능도 수행하여 횡방향 변형과 수직방향 침하의 발생을 동시에 방지할 수 있다. 또한 접속슬래브와 앵커슬래브 사이에 받침슬래브를 설치하여 두 슬래브사이의 단차발생을 억제할 수 있다.

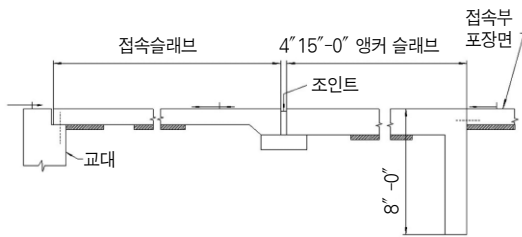


그림 11. 앵커슬래브를 이용한 접속슬래브 침하개선방법

뒷채움재료 및 성토재료가 침투된 물로 인해 침식이 발생하지 않기 위해서 아래와 같은 규정이 제시되었다(Seo 등, 2002). 이와 같은 규정은 대부분의 국내 뒷채움재료 규정을 만족하지만 앞서 지적한 바와 같이 일반 성토재료 및 노상재료에 대해서는 침식에 대한 저항성을 새롭게 규정하기 위한 연구가 필요한 실정이다.

표 2. 침식방지를 위한 재료의 사용규정(Seo 등, 2002)

소성지수(PI)	15 이하
200번체 통과량	20% 이하
균등계수(Cu)	3 이상

Schaefer와 Koch (1992)는 일체식 교량의 경우 열팽창에 의한 공동발생과 이로 인한 단차발생을 억제하기 위한 방법으로서 아래와 같은 방법을 추천하였다.

- ① 접속부 성토체(뒷채움부 포함)의 길어깨 부분

(노건)을 아스팔트로 포장하여 덧씌운다.

- ② 공동이 교대배면에서 3m연장까지 확장되거나 공동의 크기가 직경 100mm를 넘을 경우 슬래브재킹(slabjacking 또는 mudjacking)으로 슬래브를 들어 올린다.
- ③ 접속슬래브는 슬래브와 교대 접속부 부근에서 주로 발생하는 횡단균열을 최소화 할 수 있도록 충분히 배근하여 구조설계를 한다.
- ④ 뒷채움부와 성토체와의 경사는 4(수평):1(수직)~2(수평):1(수직) 사이가 되도록 한다.
- ⑤ 슬래브 하단에 침식방지를 위한 토목섬유 차단막의 사용을 고려하여야 하며 이와 같은 토목섬유 차단층은 향후 슬래브의 처짐 발생 시 슬래브재킹의 그라우트 차단층으로 사용될 수도 있다.

앞서 지적한 바와 같이 도로상부로부터 침투된 물이 뒷채움토와 성토체 구성재료를 침식시키지 않도록 하기 위해서는 침식에 저항할 수 있도록 재료의 입도조정이 필요하다. 뒷채움토는 주로 SB1 또는 SB2재료를 사용하도록 규정되고 있으나, 재료가 고가이므로 최근 이를 일반 성토재료 대체하고자하는 기술적 검토가 있었다. 그러나 비교된 입도분포상으로 따져 보았을 때 국내에서 사용되는 뒷채움재료의 일부 입도대역에서 침식이 가능한 것으로 판단되며 아울러 성토재료 사용되는 일반 노상재료는 상당부분 침식가능 대역과 겹칠 것으로 판단된다. 따라서 일반 성토재는 접속슬래브 하단부에서는 절대로 사용하지서는 안 될 것이다.

국내 SB1 및 SB2 뒷채움재료의 침식가능성을 검토한 그림 5를 보면 국내 뒷채움재료로 사용되는 보조기층 SB1 및 SB2 재료는 대부분의 입도대역에서 침식이 되지 않는 것으로 나타났으나 입도밴드를 상한, 중간, 하한으로 나누었을 때 상한입도와 중간입도는 일부 작은 입경대역에서 침식이 가능한 것으로 판단되었다. 따라서 접속슬래브가 놓이는 뒷채움부를 보조기층 재료에 준하는 재료로 사용할 경우에는

가능한 하한계 쪽에 가깝도록 입도조정하여 다짐을 실시하여야 할 필요가 있다.

4. 결 언

도로의 단차는 주행안정성과 쾌적성에 심각한 영향을 미칠수 있으나 현재까지는 평탄성에 비하여 그 중요성이 간과되어왔다. 단차를 발생 시킬 수 있는 여러가지 원인을 살펴보았으며 이러한 도로단차의 발생을 차제에 예방할 수 있는 기술적 가능성과 그 적용사례를 살펴보았다.

참고 문헌

최준성, 김종민, 김부일, 한진석, “탄성계수에 근거한 포장하부구조 다짐기준 정립을 위한 기초 연구” 한국도로학회 2006 학술발표회 논문집 제8권, 2006. 10, pp.327~332

정성교, 정인준, 김명모, “뒷채움의 다짐에 의한 횡방향 토압”, 대한토목학회 논문집 제11권, 제2호 pp.51~64

과학기술, 2000, 도로구조에 관한 국내·외 설계 기준(한국, 미국, 독일, 일본)

안덕순, 권수안, 서영찬, 엄병식, “포장파손예측모형을 이용한 잔존수명 산출에 대한 연구” 한국도로학회 2002 학술발표회 논문집 제4권 제1호, 2002. 10, pp.233~236

David White, Sri Sritharan, Muhannad Suleiman, Mohamed Mekawy, and Sudhar Chetlur (2005), “Identification of the best practices for design, construction, and repair of bridge approaches”, Iowa DOT Project TR-481

Seo, J.B., Ha, H.S. and J.-L. Briaud(2002) “Investigation of Settlement at Briadge Approach Slab Expansion Joint: Numerical Simulation and Model Tests.” Texas Transportation Institute, College Station, Texas

Ha, H.S., Seo, J.B. and J.-L. Briaud(2002) “Investigation of Settlement at Briadge Approach Slab Expansion Joint: Survey and Site Investigation.” Texas Transportation Institute, College Station, Texas

AASHTO, 2001, A POLICY on GEOMETRIC DESIGN of HIGHWAYS and STREETS

학회지 광고접수 안내

본 학회지에 게재할 광고를 모집합니다. 우리 학회지는 계간으로 매회 2,100부를 발간하여 회원과 건설관련 기관에 배포하고 있습니다. 회사 영업신장과 이미지 제고를 원하시는 업체는 우리 학회지를 이용하시기 바랍니다.

광고료 : 표2 · 표3 · 표4(300만원) · 간 지(200만원)

※ 상기금액은 연간(4회)광고료임.

사단법인 **한국도로학회**

전화 (02) 3272-1992 전송 (02) 3272-1994