

토공노반의 침하억제성능 향상을 위한 설계기준 개선 방안



이 일 화
한국철도기술연구원
책임연구원
T.010.4506.1650
iwlee@krii.re.kr

1. 서론

콘크리트궤도는 주행품질 및 유지보수 측면에서 상당한 장점을 가지고 있기 때문에 광범위하게 확대 적용될 것으로 예상된다. 국외의 경우, 유럽, 중국, 일본 등 각 국의 고속철도에 널리 사용되고 있으며 국내에서도 경부고속철도 1단계 장대터널 구간을 시작으로 신설 일반철도 및 고속철도 건설에 채택하고 있다. 콘크리트궤도는 대부분의 성능면에서 자갈궤도보다 월등히 유리하지만, 침하에 매우 취약한 단점이 있다. 콘크리트궤도에서 침하에 의한 궤도틀림이 발생하였을 경우에는 체결장치를 이용한 틀림보정이 가능하지만 과도한 침하가 발생하게 되면 침하의 원인인 노반을 보수, 보강하여야 하기 때문에 열차가 운행중인 영업선에서는 유지보수에 많은 어려움이 따른다. 따라서 토공구간에 콘크리트궤도를 건설할 경우에는 침하에 대한 모든 변수를 고려하여 보다 안전측으로 건설할 필요가 있다. 특히 국내는 지형적 조건으로 인하여 구조물이 많고 국부적인 연약개소가 많이 분포하기 때문에 콘크리트궤도를 성공적으로 정착시키기 위해서는 이러한 지형 및 건설 환경을 고려한 철저한 대책수립이 필요하다. 본 고(告)에서는 그 동안의 연구결과를 바탕으로 토공노반의 침하억제성능 향상방안 중 설계 기준 및 편람과 관련된 사항을 제안하고자 한다.

2. 콘크리트궤도노반의 침하

콘크리트궤도에서는 주행안전 및 승차감을 확보하기 위하여 변위와 침하를 엄격하게 제한하고 있다. 이를 위해서는 토공, 교량, 터널 각각의 노반 형식에 적합하게 건설하는 것이 중요하다. 일반적으로 토공노반의 침하는 성토하중 등의 사하중에 의한 원지반의 침하, 성토 자체의 압축하중 및 열차 하중에 의한 성토부 침하로 크게 구별된다. 이중 성토하중 및 열차하중은 단기간 내에 발생하여 잔류침하에는 거의 영향을 미치지 않지만, 원지반침하는 궤도구조에 지속적인 영향을 미치므로 철저한 대책이 필요하다.

침하의 주요 원인은 지반조사 미흡, 원지반처리 불량, 성토다짐 불량, 배수 불량, 접속처리 미흡 등이며 대부분의 침하문제는 복합적인 원인으로 발생한다. 침하방지를 위해서는 철저한 사전조사를 필요로 하는데, 사전조사 시에는 지반조사, 침하예측, 대책공법의 적용 등이 검토되어야 한다. 지반조사는 일정거리 마다 수행되지만, 국부적인 지반결함이 예상되는 구간에서는 연속적인 조사를 수행할 필요가 있다. 침하량에 대한 산정은 지형 및 지질 조건, 환경적 요인, 열차주행 특성, 토공재료 등에 대한 정확한 자료 분석이 요구되기 때문에 장기간에 걸쳐 시공되는 철도건설에서는 대단히 어려운 작업이라 할 수 있다. 침하예측은 주로 계측결과를 이용하여 이루어지게 되는데, 시공 중 발생하는 침하량을 계측하고 이를 바탕으로 향후 잔류침하량을 예측하여 침하량이 과다할 것으로 판단되는 경우에는 별도의 보강대책을 적용하여야 한다.

<표 1> 허용잔류침하량 기준

철도설계기준(노반편), 2013
(1) 콘크리트궤도의 허용잔류침하량은 30mm 이하로 한다. 허용잔류침하량 30mm는 노반 인수인계 후 예상되는 원지반 침하량과 성토체 침하량 및 궤도구조에서의 침하량(총합 25mm), 그리고 열차하중에 의한 침하량(5mm로 가정)을 모두 포함한다.
(2) 분지모양으로 잔류침하형태가 나타날 경우 큰 반경(중곡선)으로 보정되는 것이 허용될 수 있으므로 경사부를 $r_b > 0.4 \cdot V_b^2$ 에 따라 보정할 수 있을 때, 공단과 협의 하에 잔류침하량을 60mm까지 허용할 수 있다. 여기서 r_b 는 보정반경(m)을 의미하고 V_b 는 설계속도 km/h를 의미한다.

2.1 콘크리트궤도의 허용잔류침하기준

콘크리트궤도의 허용잔류침하기준은 유지보수상의 목적으로 결정된다. 침하기준의 산정은 체결구의 상하조절 여유량과 슬래브궤도의 구조적 허용변형량, 승차감 등으로 결정한다. 체결구의 조절여유량은 20~30mm를 적용으로 하고 있으며, 증가하고 있는 추세에 있다. 허용잔류침하량은 일반적으로 30mm를 채택하고 있는데, 일본의 경우에는 최근 50mm로 확대 적용하고 있다[14].

2.2 토공노반의 침하 유형

콘크리트궤도 구간에서 노반 침하는 연약지반 또는 구조물 접속부 등과 같이 통상적인 취약개소를 비롯하여 전혀 예상치 못한 곳에서도 발생하게 된다. 침하의 패턴 또한 위치에 따라서 다양하게 분포하는데, 주요 침하유형을 정리하면 아래와 같다.

① 접속부 구간

접속부 구간은 교량/토공, 터널/토공, 박스/토공, 자갈도상궤도/콘크리트궤도 등이 있다. 이 중에서도 가장 취약한 접속부는 교량/토공구간으로서 노반의 지지강성 차이가 주요 원인이다. 교량/토공접속부에서는 부등침하방지를 위하여 approach block, approach slab를 설치하여 부등침하 발생을 최소화하고 있다.

② 연약지반 구간

침하에 가장 취약한 구간중 하나로서 원지반이 연약한 구간이다. 연약지반 구간은 설계단계에서부터 정밀한 조사를 통하여 적절한 처리공법을 적용하여야 한다. 그럼에도 불구하고 조사단계에서의 소홀, 부적절한 침하대책, 부

정확한 침하 예측, 방치기간 부족 등으로 인하여 침하가 발생한다.

③ 국부적 취약 구간

과거 소하천이었거나 짧은 계곡부 또는 복잡한 지형구간 등에서 침하가 발생한다.

④ 종구배 변곡 구간

중곡선의 기울기가 하구배에서 상구배로 변화하는 변곡구간에서 침하가 많이 발생하는 것으로 보고되고 있다.

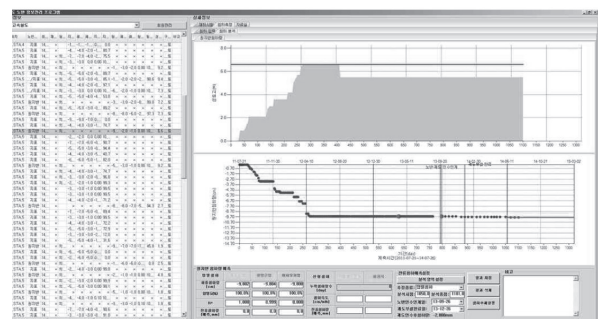
⑤ 배수불량 구간

배수불량은 주로 절성토 경계부나 편절편성 구간에서 발생하게 되며, 배수불량에 따른 이토화에 의해 지속적인 변형이 발생한다.

2.3 침하 관리

노반의 침하관리자료는 유지보수에 매우 중요하게 활용되기 때문에 공사 착공과 동시에 관리도 착수되어야 한다. 침하관리는 침하량, 침하연장, 지반조건, 시공조건, 보수이력 등이 포함되어야 하며 개통 이후 침하의 안정화가 확인되는 단계까지 시행하여야 한다. 침하관리는 일차적으로는 상대변위를 사용하는 궤도틀림량을 기본으로 하고 이차적으로는 절대변위값인 허용잔류침하량을 사용한다. 침하에 대한 보수는 체결장치의 고저조절패드를 이용하는 것을 기본으로 하고, 궤도의 손상이 확인되거나 과도한 침하가 발생하였을 경우에는 복원공법을 적용한다.

아래 <그림 1>은 호남고속철도구간에서 적용하고 있는 침하관리프로그램을 나타낸 것이다. 호남고속철도구간은 연약지반지역이 넓게 분포하기 때문에 침하관리를 위하여 총침하량 1,200개, 궤도상면에 설치된 침하핀 약 10,000개



<그림 1> 호남고속철도 노반침하 모니터링 시스템

〈표 2〉 연약지반 판정기준

한국(철도설계기준, 2013)			일본(철도구조물등 설계표준 및 동해설, 2007)		중국
구분	점성토		사질토	홍적층	
층두께	10m미만	10m이상		점성토	사질토
N치	4이하	6이하	10이하	4이하	20이하
q _u (kN/m ²)	60이하	100이하			

경험적 방법을 이용한 한계상태 적용

① 원지반의 함수비가 액성한계보다 큰 경우
 ② 간극비가 1.0~1.3보다 큰 경우
 ③ 비배수전단강도가 20kPa 이하인 경우

를 대상으로 정기적인 계측과 분석을 시행하고 있다. 또한 관리프로그램에 시공 및 설계 자료가 연동되어 있으며, 향후 장기침하에 대한 예측도 가능하도록 되어 있다.

3. 침하관련 설계기준 개선 방안

3.1 연약지반 판정 기준

콘크리트궤도에서 연약지반의 판정은 허용잔류침하량 기준(30mm)을 만족하지 못하는 모든 지반을 대상으로 하여야 하지만 설계단계에서의 판정이 곤란하여 실무적 견지에서 기준이 필요하였다. 그래서 설계지침 및 설계기준에서는 점성토인 경우 N치가 4~6 이하, 사질토인 경우는 10 이하를 연약지반으로 판정하였다. 그러나 이 기준은 일반토목 및 도로에서 적용하는 기준으로서 잔류침하가 엄격한 콘크리트궤도노반에 적용하는 것은 적절하지 않다. 2007년 개정된 일본 철도구조물 등 설계표준 및 동해설에 따르면 사질토의 경우에는 N치를 20 이하로 규정하고 있다[14]. 중국철도에서는 경험적 한계상태를 적용하여 액성한계, 간극비, 비배수전단강도를 기준으로 사용하고 있다. 향후 콘크리트궤도노반의 연약지반 판정기준은 지반조건 및 건설환경을 고려하여 상향조정할 필요가 있으며 N치 이외의 연약지반 특성을 충분히 반영할 수 있는 판정기준 적용이 요구된다.

3.2 허용잔류침하량 기준

자갈궤도는 침하 발생시 자갈보충을 통한 보수가 쉽기 때문에 허용잔류침하기준을 100mm를 적용하고 있다. 콘크리트궤도는 허용잔류침하량기준을 30mm로 적용하고 있는데, 그 근거는 체결장치의 보수한계, 차량의 주행안정

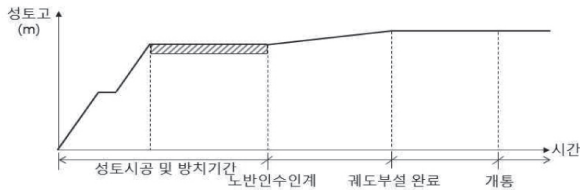
성, 궤도의 구조안정성을 고려하여 결정하고 있으며, 이 중에서 가장 중요한 요소는 체결장치의 보수한계이다. 현재 체결장치의 보수한도는 30mm를 적용하고 있으나 제조사에서는 <표 3>과 같이 55~56mm까지 조정 가능한 것으로 자체 시험결과를 제시하고 있다. 향후 체결장치의 고저조절한계에 대한 검증을 통하여 조절량을 확대할 수 있다면 허용잔류침하기준도 확대 적용할 수 있어 노반건설비 및 유지보수노력을 대폭적으로 줄일 수 있다. 일본의 경우, 사용성 측면에서 50mm까지는 허용하고 있다[14].

허용잔류침하량의 기준 시점도 매우 중요한 의미를 가지고 있는데, 호남고속철도설계지침(2007)에서는 궤도부설 완료 후를 기준으로 하였지만, 2012년 개정된 철도설계기준(노반편)에서는 노반 인수인계시점으로 변경되었다. 노반 인수인계시점을 기준으로 할 경우, 관리측면에서는 편리하나 노반 인수인계시점과 궤도부설완료시점은 약 3~12개월의 시간차가 발생하기 때문에 적용에 다음

〈표 3〉 레일체결장치의 보수한계 (제조사 제시)

종류	고저조정		좌우조정	
	조정방법	조정한계	조정방법	조정한계
Vossloh System 300	레일패드 교체, 높이조절용 Plastic Shimplate 및 Steel Plate 삽입	+56mm*/-4mm	Guide plate 교체	±8mm
Pandrol SFC	Shimplate 삽입/교체	+55mm**/-5mm	베이스 플레이트의 톱니와서 이용	±18mm

주) *26mm 이상은 steel plate 삽입 및 앵커볼트 교체 필요
 **30mm 이상 조정할 경우 앵커볼트 교체 필요



〈그림 2〉 기준시점별 침하량의 변화

과 같은 불합리한 측면이 있다.

궤도공사 시에는 레일레벨을 기준으로 콘크리트를 타설하기 때문에 이전에 발생한 침하는 보상이 된다. 즉, 궤도시공 시에는 노반은 침하되어 있더라도 레일레벨에서의 침하량은 없다. <그림 2>를 참조하면 침하곡선 ①과 같이 추가침하가 발생하지 않거나 작은 경우에는 영향이 없으나, 침하곡선 ②와 같이 잔류침하가 지속적으로 증가하는 경우에는 δ 만큼의 차이가 발생하여 가용 허용잔류침하량이 작아지게 된다.

실질적으로 궤도부설 이후의 침하만이 궤도안정성과 주행안정성에 영향을 미치기 때문에 허용잔류침하량의 기준시점은 궤도부설 완료 후로 하는 것이 합리적이다. 이 경우의 각 구간의 완료시점은 다르게 적용된다.

3.3 방치기간

<표 4>는 철도설계기준에서 제시하는 방치기간으로서 성토하중에 대한 영향을 줄이기 위하여 성토가 완료된 상태에서 일정 기간을 방치하게 되어 있다. 표에서는 성토지반별(원지반), 성토 재료별로 구분되어 있으며, 세립토는 점성토지반을 의미한다. 방치기간의 확보는 성토재료의 안정화에도 필요하지만, 주 목적은 원지반의 안정화이다. 따라서 성토 재료로 구분되는 방치기간의 조건(1~3개월)은 적용하지 않는 것이 합리적이다. 방치기간의 적용은 효과적인 연약지반처리방안으로서 충분한 기간을 확보하는 것이 필요하다.

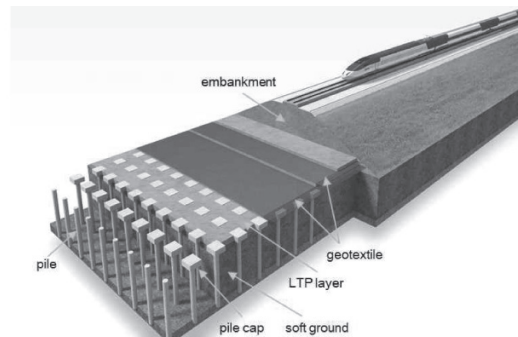
〈표 4〉 성토의 방치기간(철도설계기준(노반편), 2013)

성토재료 성토지반	상하부성토에서 [A군] 재료의 경우	기타의 경우
세립토	3개월 이상	6개월 이상
상기 이외의 지반	1개월 이상	3개월 이상

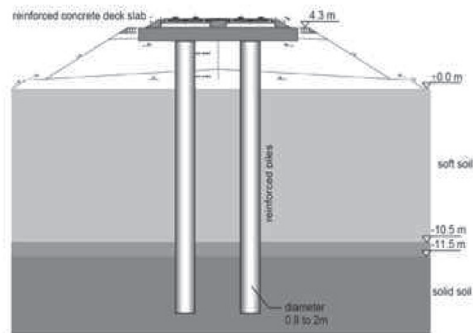
3.4 합리적 연약지반보강공법의 적용

콘크리트궤도를 적용하는 노반 건설 시에는 압밀축진공법을 이용하여 잔류침하량기준을 만족시키는 것이 어렵기 때문에 교량과 치환공법을 주로 적용하고 있다. 교량은 침하억제성능이 우수하지만 공사비가 과다하고 치환공법은 침하억제성능이 다소 낮은 단점이 있다.

이에 대한 대안으로서 국외에서는 지지말뚝공법을 널리 적용하고 있다. 지지말뚝공법은 연약지반에 말뚝을 설치하여 성토하중을 지지층까지 전달하는 방식으로 침하억제성능과 더불어 공기단축의 효과가 크다. 지지말뚝공법은 <그림 3, 4>와 같이 섬유보강 성토지지말뚝공법과 궤도지지말뚝공법으로 구분할 수 있다. 섬유보강 성토지



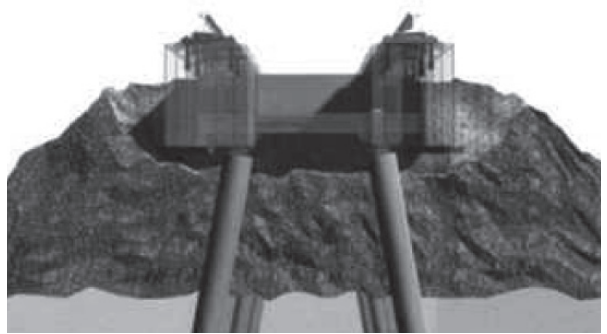
〈그림 3〉 한국형 섬유보강 성토지지말뚝공법



〈그림 4〉 궤도지지말뚝공법

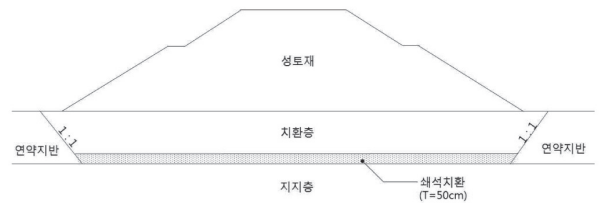


〈그림 5〉 중국 고속선용 성토지지말뚝공법



〈그림 6〉 네델란드 고속선용 궤도지지말뚝공법

지말뚝공법은 지반아칭현상을 이용하여 하중을 토목섬유와 말뚝을 통해 지지층에 전달시킴으로써 성토구조물의 안정성을 도모하고 침하를 근본적으로 억제하는 공법이다. 궤도지지말뚝공법은 궤도에 말뚝을 직접 연결하여 열차 및 궤도 하중을 하부 지지층으로 바로 전달한다. 지지말뚝공법은 현재 철도연구원에서 실용화연구를 수행중에 있으며 2016년 적용을 목표로 하고 있다.



〈그림 7〉 치환공법 적용 사례

3.5 치환공법의 설계조건 명확화

치환공법은 일정 깊이의 지반을 양질의 채움재로 치환하는 대표적인 연약지반처리공법이다. 치환공법 적용시 원지반 지지력이 부족하거나 치환 재료 또는 다짐도가 불량할 경우에는 잔류침하가 발생하기 때문에 다음과 같은 개선사항이 필요하다.

① 원지반 및 치환층 다짐기준

연약지반 제거 후 치환재료가 포설되는 바닥면 및 치환층의 다짐기준이 제시되어야 한다.

② 치환재료의 기준

다양한 치환재료가 사용되지만 별도의 규정이 없는 상태이다. 양질의 토사에 대한 상세기준이 요구되며 암버력을 활용하는 경우에는 강도 및 입도제한 등이 포함된 기준이 필요하다.

③ 지하수 변동에 따른 지지강성 저하 방지

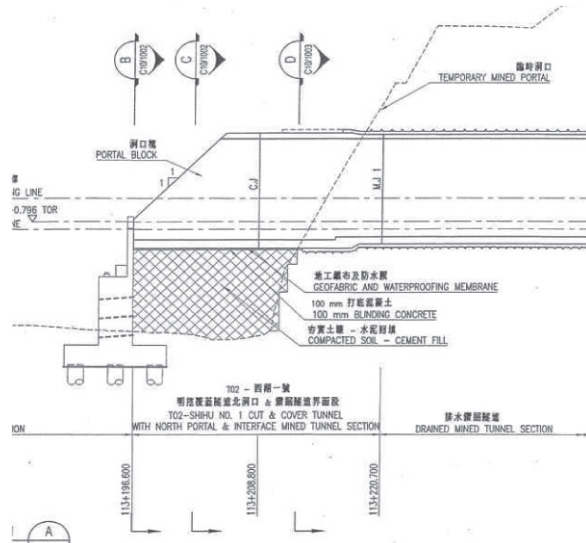
치환층이 지하수 변동의 영향을 받을 경우, 추가침하가 발생할 가능성이 있기 때문에 지하수 위의 영향을 받지 않도록 조치하여야 한다.

3.6 근접접속부 기준 신설

철도설계편람에는 교량-토공, 터널-토공, 암거-토공의 접속부 기준이 제시되어 있다. 이 중 교량-토공 접속부는 침하에 가장 취약하여 어프로치 슬래브가 추가되었으며, 어프로치 블럭의 연장을 성토고의 4배 또는 20m 이상으로 제시하고 있다(기존 연장은 10m). 호남고속철도의 경우, 대부분의 구간에서 성토고의 4배를 적용한 것으로 조사되어 접속부에서의 문제점들이 많이 해소되었지만 단일 표준단면만 제시되어 있어 적용성이 다소 제한적이었다. 특히 국내 선로특성상 계곡부 등을 통과할 경우에는 터널과 교량구간이 매우 가깝게 위치하는 근접접속 구간이 많이 발생하게 되어 이에 대한 기준 제시가 필요하다. 기준에는 표준단면, 재료, 다짐조건 등이 포함되어야 한다.

〈그림 8〉은 대만고속철도 설계기준에서 제시한 근접접속부의 표준단면으로서 어프로치블럭을 시멘트처리토로 보강하고 터널구간을 교대에 바로 접속시켜 강성변화를 최소화한 사례이다.

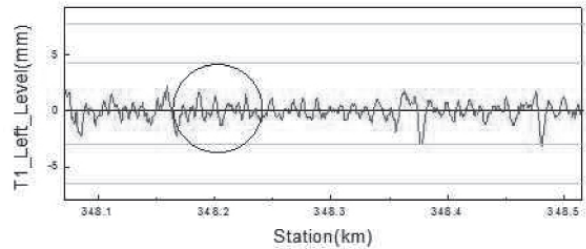
〈그림 9〉는 경부고속철도 2단계구간의 근접접속부 구간으로서 접속부 하단의 연장이 약 5m 정도만 확보되어 기존 설계표준도를 이용하여 시공하는 것이 어려웠기 때



〈그림 8〉 대만고속철도 근접접속부 설계표준



〈그림 9〉 근접접속부 구간 (경부2단계)



〈그림 10〉 해당구간에서의 궤도틀림(고저)

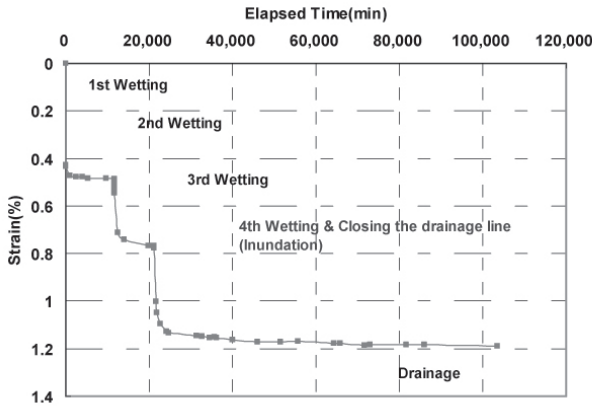
문에 시멘트처리자갈 뒤채움하는 것으로 설계변경한 사례이다. 개통 이후 해당구간의 궤도틀림이 <그림 10>과 같이 일반구간과 동등수준인 것으로 나타나 성공적인 적용 사례라고 할 수 있다. 이와 같이 특수구간에서는 시멘트처리토 또는 자갈로 시공하는 것이 효율적일 수 있다.

3.7 암성토 기준 개선

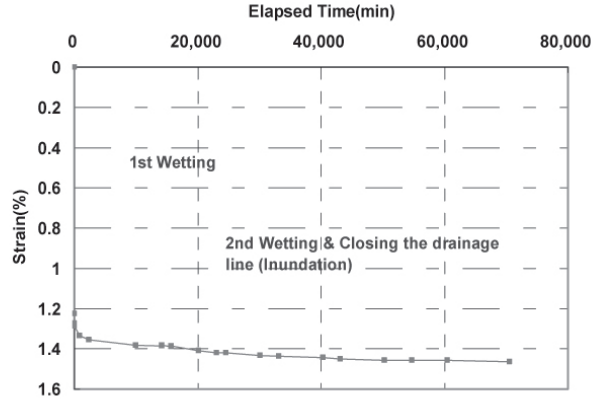
저수지나 댐과 같은 대성토시 성토체의 자체 압축이나 침하는 고려하지 않는 것이 일반적이었다. 그 이유는 허용 잔류침하량 기준이 크고 원지반의 압밀 또는 압축에 비하여 성토체의 압축침하량이 매우 작았기 때문이다. 그러나 고속철도의 경우에는 허용잔류침하량이 작기 때문에 원

지반 뿐만 아니라 성토체의 침하특성도 고려되어야 한다. 일반적으로 성토체의 크리프 침하량은 성토고의 0.1% 정도가 발생하는 것으로 알려져 있는데, 성토고가 10m인 경우, 크리프 침하량만 10mm에 달한다.

국내에서는 성토다짐시 암버력을 많이 활용하고 있는데, 외국 연구결과에 의하면 장기적인 침하특성에 있어 암성토가 흙성토 보다 불리한 경우도 보고되고 있다. <그림 11>은 암버력시료에 대한 살수시험시의 침하특성을 비교한 그림이다[9]. <그림 11> (a)는 건조다짐한 경우이고, (b)는 습윤다짐한 경우이다. 상재하중이 재하된 상태에서 함수비를 급격히 증가시키면 건조다짐인 경우에 급작스런 침하가 발생하는데, 이를 hydrocollapse라 한다. 이 현상은



(a) 건조다짐한 경우



(b) 습윤다짐한 경우

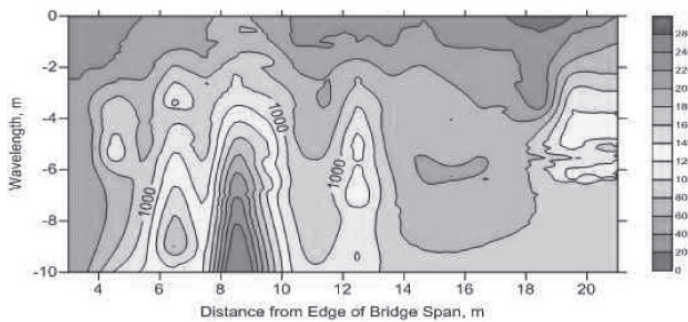
<그림 11> 암버력으로 다짐한 시료의 살수시험 결과

점 접촉으로 지지하는 암성토체에서 함수비 증가에 따른 접촉력 저하로 발생하는데 연약한 암버력을 사용한 구간에서 많이 발생한다. hydrocollapse를 방지하기 위해서는 성토재의 다짐특성을 명확히 파악하고, 최적함수비보다 높은 상태(OMC+2%)에서 다짐하는 것이 좋다. 더불어 입도조정 및 최대입경에 대한 제한을 재검토할 필요가 있다.

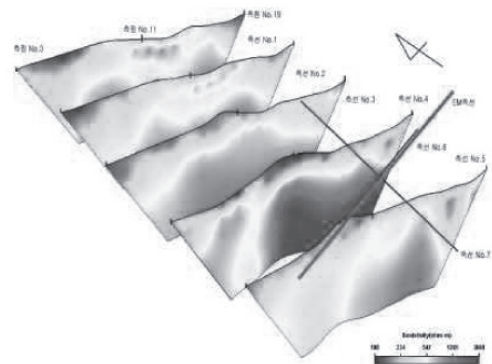
3.8 지반조사 체계의 개선

현행 지반조사는 시추조사를 기반으로 하고 있다. 시추조사의 간격은 교량의 경우에는 각 교각의 위치마다 1개 소씩(30~40m)이며 토공의 경우에는 별도 규정이 없으나

약 300~500m간격마다 조사를 시행하고 있다. 현행 조사 방식으로는 시추위치의 자료만 확보할 뿐 그 외 구간은 추정하여 사용할 수밖에 없다. 침하원인 중 하나는 지반조사 미비로 인한 지반정보의 부족으로 연약구간을 확인하지 못하는 경우이다. 국부적인 연약지반개소를 파악하기 위해서는 계획노선에 대한 2차원적인 지반정보 획득이 가능한 탐사기법을 적용할 필요가 있다. 2차원 지반정보의 획득이 가능한 탐사기법으로는 전기비저항, 탄성파탐사 등을 고려할 수 있는데, 이러한 조사법은 <그림 12>와 같이 빠른 시간내에 지반의 2차원 상구조를 제공해 준다. 외국 사례를 보면 우선적으로 비파괴조사를 먼저 시행하여 2

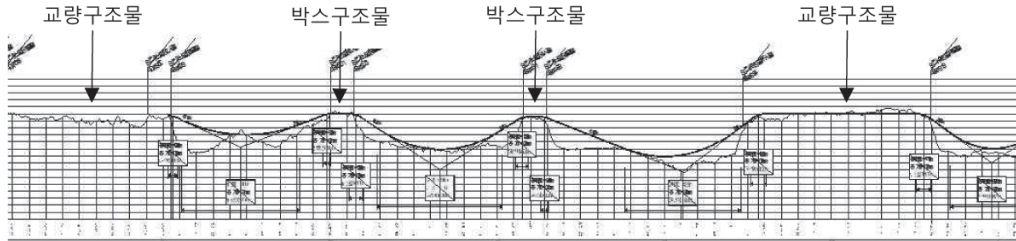


(a) 탄성파 탐사



(b) 전기비저항 탐사

<그림 12> 2D 및 3D 지반정보를 획득하기 위한 비파괴 조사법



〈그림 13〉 깊은 기초(말뚝)를 적용한 박스구조물로 인한 부등침하 발생 사례

차원 지반정보를 확보하고 확인 차원에서 소정의 시추조사를 시행한다. 이와 같은 방식은 보다 상세한 지반정보를 제공하여 연약지반개소의 확인이 쉬우며 시추공 수를 줄여 총 지반조사비용은 비슷한 수준으로 소요된다.

3.9 박스구조물(암거)의 기초형식 최적화

박스구조물(암거) 설계시에는 구조물 자체의 안정성 확보 등을 이유로 깊은 기초(말뚝)를 적용하는 경우가 많은데 연약지반인 경우에는 부등침하의 원인을 제공한다. <그림 13>은 깊은 기초를 적용한 박스구조물의 부등침하 발생으로 인한 종곡선 변화를 나타낸 그림이다. 깊은 기초를 적용하게 되면 구조물 구간에서는 침하가 발생하지 않고 순성토 구간에서만 침하가 발생하여 위의 그림과 같이 부등침하가 발생하게 되어 유지보수대상이 된다. 이러한 구간에서는 구조물의 안정성을 저해하지 않는 범위에서 얕은 기초를 적용하여 순성토 구간과 동등 수준의 침하를 유발한다면 향후 유지보수시에 유리해질 수 있다. 연약지반구간에서 박스구조물 설계시에는 구조물의 안정성을 저해하지 않는 범위 내에서 순성토 구간과 침하량이 유사해지도록 검토할 필요가 있다.

4. 마무리

지금까지 토공노반은 건설비가 상대적으로 적게 소요되고 기술적으로도 중요도가 낮게 인식되어 왔으나, 콘크리트궤도가 도입되면서 안정적인 토공노반의 건설, 특히 침

하방지는 중요한 사안으로 대두되고 있다. 특히 국내는 지형조건 및 건설여건이 콘크리트궤도를 적용하기에 다소 불리하기 때문에 노반의 침하억제 성능을 향상시키기 위한 지속적인 노력이 필요하다. 이를 위해서는 제도적으로 개선이 가능한 부분은 신속히 개선하고 추가적인 연구가 필요한 부분은 장기적인 안목으로 계획을 수립하고 다양한 논의를 통하여 개선하여 나가야 할 것으로 사료된다. ☺

♣ 참고문헌

- [1] 철도설계기준(노반편), 한국철도시설공단, 2013.
- [2] 호남고속철도 설계지침, 한국철도시설공단, 2007.
- [3] 호남고속철도 궤도형식 선정 및 토공구간 콘크리트궤도 시공에 따른 지반안정성 검토 연구보고서, 한국철도시설공단, 2007.
- [4] 고속화를 위한 선로구축물 핵심기술개발 보고서, 한국철도기술연구원, 2011.
- [5] 고속철도 콘크리트궤도 유지보수기준 정립방안 연구보고서(침하 및 균열), 한국철도시설공단, 2012.
- [6] 철도 토공구간 원지반 안정성 강화기술 개발 보고서, 한국철도시설공단, 2008.
- [7] 경부고속철도 2단계 12-5공구 노반침하구간에 대한 정밀안전진단 및 보수보강대책수립 용역보고서, 한국철도기술연구원, 2012.
- [8] 구조물-토공 접촉부 노반강성차 완화방안 연구보고서, 한국철도시설공단, 2012.
- [9] 이성진, 이일화, 이진욱, 이준석, "콘크리트궤도 하부조립지반재료의 장기압축침하에 관한 연구", 지반공학회 논문집, Vol.25, No.8, 2009.
- [10] 이일화, 장승엽, 엄주환, 최원일, 박병주, "콘크리트궤도 노반침하에 대한 유지보수 방안", 한국철도학회 추계학술발표회 논문집, 2012.
- [11] 須田 征男, 長門 彰, 徳岡 研三, 三浦 重, "新しい線路-軌道の構造と管理", 社団法人日本鐵道施設協會, 1997.
- [12] 省力化軌道の管理, JR東日本設備部, 2006.
- [13] 日本鐵道構造物等設計標準・同解説-變位制限編, 鐵道總合技術研究所, 2006.
- [14] 鐵道構造物等設計標準・同解説(土構造物), 鐵道總合技術研究所, 2007.
- [15] 고속철도 비자갈선 궤도지반말뚝노반의 이론과 실천, 중국철도출판사, 2011.