

연약지반을 지나는 고속도로의 건설과 유지관리

조성민*, 김성환**

1. 개요

1969년 경인고속도로가 건설된 이래로 우리나라의 고속도로 연장은 매년 증가하여, 2000년 12월초 현재 21개 노선에 20,068km(민자유치사업구간 제외)에 이르고 있다. 또한 2004년까지 고속도로의 연장을 3,700km까지 늘이기 위하여 현재 14개 노선(1,439km)의 신설과 기존 고속도로 15개 노선(531km)의 확장을 진행 중에 있다(그림1).

국가 경제의 대동맥 역할을 하는 고속도로는 산업과 국민 생활에 미치는 영향이 지대하여 고도의 품질과 구조적 안정성이 요구되는 중요한 토목구조물로서, 그 건설에는 당대의 모든 앞선 토목기술들이 적용된다. 연약지반과 관련한 기술적인 문제들에 대한 고민은 1960년대 말 정부고속도로 건설 당시부터 지금까지 지속되어 오고 있으며, 우리나라에서 연약지반의 조사와 처리를 위한 기술의 발전은 고속도로의 건설 역사와 그 궤를 같이 하고 있다고 해도 과언이 아니다.

이 글에서는 연약지반을 경유하여 건설된 우리나라 고속도로의 시공 현황 및 유지관리 방법들을 소개한다.

2. 고속도로 노선 중 연약지반 현황

2.1 연약지반 판정기준

* 정희원, 한국도로공사 도로연구소 책임연구원, 공학박사 (chosmin@freeway.co.kr)

** 김성환, 한국도로공사 도로연구소 수석연구원, 공학박사 (shkim@freeway.co.kr)

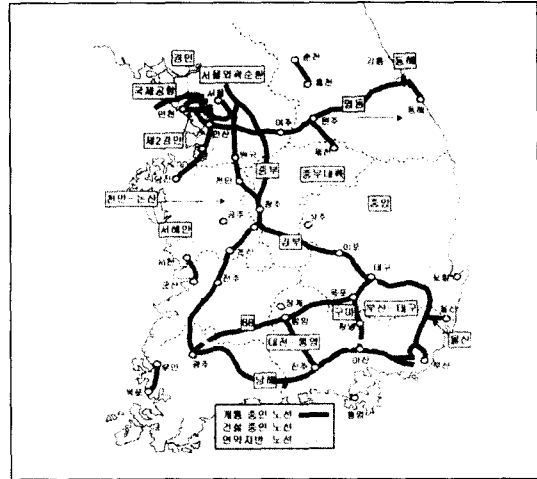


그림 1. 고속도로 노선도

고속도로 설계시 연약지반 여부에 대한 평가는 지반조사 결과를 토대로 표1의 기준을 참조하여 결정하는 것이 일반적이다. 표1은 일본 토질공학회의 분류에 근거한 일본도로공단 기준을 준용한 것으로서, 근본적으로는 Terzaghi와 Peck(1948)의 연경도 분류에 기초하고 있다. 국내에서는 발주기관, 설계사를 불문하고 주로 표 1의 N 값을 이용한 기준을 활용하고 있으나, 이 표에 제시된 기준은 단지 참조의 대상일 뿐이며, 실제 현장에서 연약지반 여부를 판정할 때에는 하부지반의 전단강도 특성 외에도 성토 높이, 성토 조건, 점성토층의 두께 및 압밀 특성(압축성), 상부 구조물의 중요도 등을 고려해야 한다. 경우에 따라서는 강도 개념에 근거한 '연약지반'이라는 용어 대신 '처리필요지반', 또는 '압밀축진대상지반' 등 변형 관점의 용어를 사용하는 것이 보다 적절할 수도 있다.

표 1. 일반적인 연약지반 판단기준(한국도로공사, 1992)

구분	연약층 두께(m)	N	qc (kg/cm ²)	qu (kg/cm ²)
점성토 및 유기질토	D < 10	4 이하	8 이하	0.6 이하
사질토	D ≥ 10	6 이하	12 이하	1.0 이하
사질토	-	10 이하		

2.2 연약지반 구간 현황

우리나라에서 연약지반은 주로 해안 지역과 내륙의 하천 연안 지역에 분포하고 있으며, 고속도로의 경우, 경부고속도로, 남해고속도로, 호남고속도로, 인천국제공항고속도로의 일부 구간이 연약지반상에 건설되었고, 현재도 서해안고속도로, 천안-논산간 고속도로 등이 연약지반층을 경유하여 건설 중에 있다(그림1). 서해안고속도로 건설 현장에서 나타나는 연약지반은 대부분 실트질 점성토층으로 이루어져 있으며, 그 두께는 5~20m 정도이고 함수비는 30~50% 가량이다. 이에 비하여 남해고속도로와 경부고속도로가 건설된 남해안 일대와 낙동강 연안 지역은 점성토층의 두께가 최대 40m에 이르며, 함수비도 50~70%에 이른다. 강원도 일부 및 경북 지방을 경유하는 구간에서도 실트질의 연약층이 발견되고 있다(조성민, 1998). 이 외에도 동해안에 인접하여 건설되고 있는 동해고속도로 일부 구간에서는 유기물질을 대량 함유한 유기질토층이 나타나고 있으며, 경우에 따라 유기질 함량이 50% 이상을 넘는 피트질 연약층도 확인되고 있다. 그림 2는 소성도표 사례이며(SC-AS:서해안선 ; YS-,KY:남해선 ; YJ:인천국제공항선), 그림 3은 한국도로공사에서 보유한 계도탐재형 지반조사장비인 지반특성측정시스템(GPMS, 그림4)을 이용하여 수행한 정적피에조콘관입시험(CPTU)으로 얻은 원추관입저항력 qc를 지역별로 대표적인 값을 선정하여 깊이에 따라 나타낸 것이다.

현재 개통 중인 고속도로 중 연약지반 위에 건설된 구간은 약 100km에 이르고 있으며, 2001년 말 완전 개통을 앞둔 서해안고속도로의 경우 총 연장 353km 중 약 16%에 이르는 56km 가량이 연약지

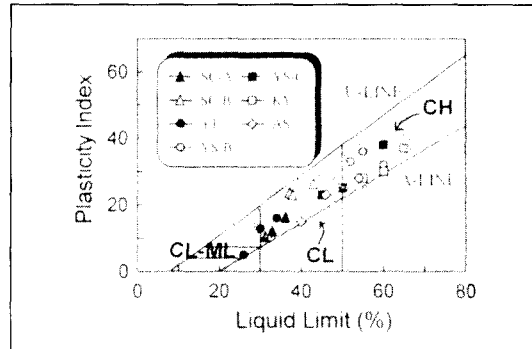


그림 2. 소성도표(조성민, 1998)

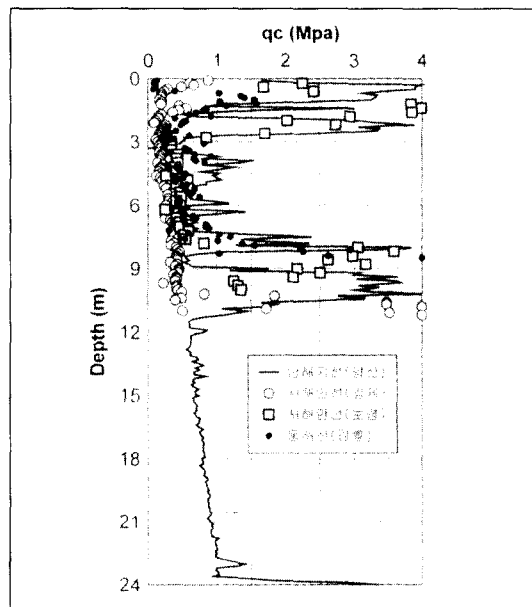


그림 3. CPT 결과(한국도로공사, 1999)

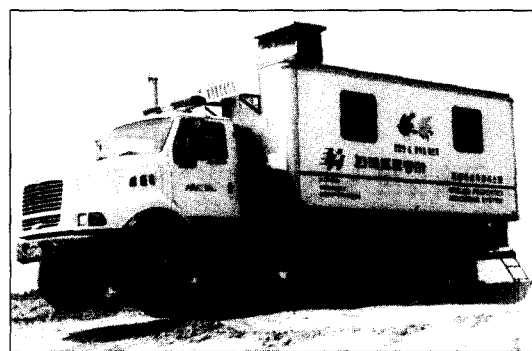


그림 4. GPMS 지반조사 장비

반을 지나고 있다(표2, 3). 서해안고속도로에 적용된 연약지반 개량공법은 선행재하공법, 치환공법, 샌드드레인공법, 팩드레인공법, 기성연직배수재(PVD)공법, 모래다짐말뚝(SCP)공법 등이며, 원지반 상부에는 장비 주행성 확보와 지반보강을 위하여 샌드매트와 지오텍스타일매트를 포설하였다. 그림5, 6은 고속도로 건설에 사용 중인 주요 토목섬유의 종류별 물량과 보강용 PET 매트의 강도별 물량을 정리한 것이다(조성민, 1999).

표 2. 개통 노선 중 연약지반 구간 현황

노선명	연장(m)	연약층두께 (m)
서해안선	35,866	2~25
제2경인선	7,310	3.5~4
서울-안산선	544	6
남해선(확장)	26,050	3~32
부산-대구선	9,502	13.6~30
구마선	11,300	4.7~23.7
남해지선	.000	4.8~25
계	102,572	

표 3. 서해안고속도로 전노선 연약지반 구간 현황

구간	총연장(km)	연약지반		
		연장(km)	심도(m)	비율(%)
인천-안산	27.6	6.4	4~17	23.2
안산-안중	42.7	7.6	1~11	17.8
안중-당진	18.8	2.7	2~7	14.4
당진-서천	103.7	2.2	1~10	2.1
서천-군산	22.7	9.8	2~22	43.2
군산-무안	114.3	25.2	1~25	22.0
무안-목포	23.2	2.2	3~6	9.5
계	353.0	56.1	1~25	15.9

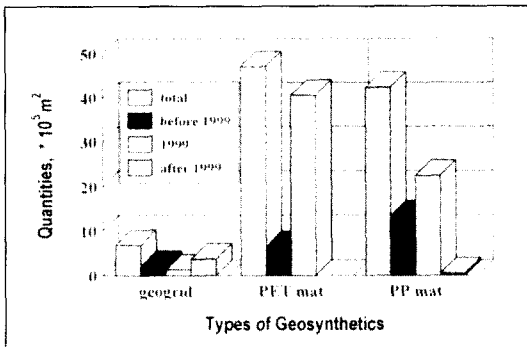


그림 5. 고속도로에 사용 중인 토목섬유

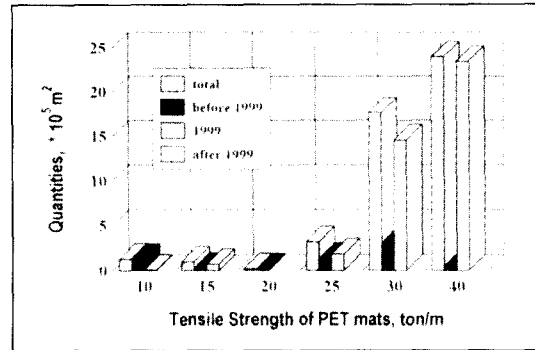


그림 6. PET 매트의 인장강도별 사용 물량

3. 연약지반 구간의 고속도로 건설공사

3.1 역사적 고찰

제조업 분야의 자동차 산업이 기계 및 전자공업의 종합제이듯이 고속도로 건설공사에는 토목 분야의 많은 기술이 집적화되어 적용되므로, 고속도로 건설 역사를 통해 특정 기술 부문을 조망해보는 것은 이 분야의 기술 발전 과정과 현재 위상을 확인해볼 수 있는 좋은 기회가 될 것이다. 다만, 우리나라의 고속도로 건설 역사가 30여년에 이르고 있음에도, 아쉽게도 많은 공사 관련 자료들이 체계적으로 정리되지 못하고 사장되고 있어 연약지반 처리와 관련한 역사적인 고찰이 매우 어려운 실정이다. 여기서는 제한된 양이나마 지금까지의 공식 기록들과 프로젝트 참여자들의 경험을 바탕으로 고속도로 건설 시기별로 연약지반 처리 기술의 변천 과정을 간략하게 살펴보고자 한다.

고속도로 건설시 연약지반에 대한 고민의 흔적은 최초의 고속도로인 경인고속도로와 뒤이은 경부고속도로 건설 당시부터 엿볼 수 있다. 한국도로공사가 창립되기 전 건설부 주관으로 1967년 3월 착공하여 이듬해인 1968년 12월 21일 개통한 경인고속도로 건설 당시에는 인천시 주안염전지대의 연약지반 처리가 최대 난공사로 꼽혔으며, 이 구간 중 2km 길이에

대해서 공식 기록상으로는 우리나라 최초로 샌드드레인공법(sand drain method, 당시에는 'sand pile 공법'으로 부름)을 도입하여 총 8,088본의 모래말뚝을 시공하였다. 1934년 미국의 캘리포니아 도로에 처음 적용된 샌드드레인공법은, 이후 1950년대에 일본에서 임해공업지대 조성시 많이 활용하였다. 당시 샌드드레인 시공에 사용한 장비는 크레인, 강관, 드롭해머 등으로 구성되었다. 이 구간은 샌드드레인 시공에도 불구하고 오랜 동안 침하가 지속되어 포장을 준공 이후인 1969년까지 연기하였다.

1968년 2월 착공 후 2년 5개월만인 1970년 7월 7일에 개통하여 당시로서는 대역사로 불리웠던 서울-부산간 경부고속도로의 건설 당시에는 전문적인 토질기술자 및 공사 경험의 부족으로 전반적인 지반조사가 매우 미흡하였는데, 낙동강 연안의 대구 팔달교 부근의 4km 구간, 경주 I/C 구간에서 연약지반이 발견되어 1969년 10월 경에 한국도로공사 시험과에서 스웨덴식 사운드링, 오거 보링, 자연함수비 측정 등을 실시하여, 그 결과에 따라 흙을 분류하고, 주상도를 작성하였다. 당시에는 표준관입시험을 실시하지 않고 스웨덴식 사운드링으로 얻은 1m당 반회전수 N_{sw} 를 이용하여 N 값을 추정($N=3+0.05N_{sw}$)하였다. 참고로, 우리나라에서 최초의 표준관입시험은 1959년 인천항 유류탱크라인을 위한 기초조사시 미국극동공병단 발주 시방에 따라 실시된 것으로 알려져 있다. 이를 통해 이 구간에서는 다량의 침하가 발생할 것으로 예측하여, 압밀침하를 촉진하기 위해서 여성토(surcharge) 공법을 적용하였으며, 또한 여성토량을 도로 노건부에 소단을 두고 분배하여 활동 방지(압성토 효과)를 도모하였다. 그러나, 일부 구간은 공사기간과 공사비의 제약으로 인해 여성토를 진행하지 못하고 침하판을 설치하여 침하량을 관측하는 방법으로 성토 시공을 강행하였으며, 침하부위는 추후에 포장 덧씌우기(overlay)를 시행하였다. 또한 장비 주행성을 높이기 위해 샌드 매트 공법을 적용하기도 하였다. 서울-오산 구간에서는 유기질토층이 일부 나타나 배수에 문제가 발생하여, 이러한 지점에

는 측구에 연결하여 맹암거를 시공하였다.

1972년 1월에 착공하여 이듬해 11월에 개통된 부산-순천간 남해고속도로의 경우는 전체 연장 177km의 14%에 이르는 24.8km가 연약지반 구간이었으며, 이 중 18.37km 구간에 대해서는 한국도로공사가 발주한 고속도로 건설 공사 최초로 샌드드레인공법을 도입하여 연약지반을 개량하였다. 당시 한국도로공사 김해공구사무소에서 남해고속도로 시점부에 적용한 샌드드레인용 모래말뚝은 직경이 현재와 같은 40cm였으며, 말뚝간 간격을 2.83~3.53m로 유지하였다. 모래말뚝의 시공 길이는 위치에 따라 6, 10, 15, 16, 20m 등으로 구분하였는데, 이 공사에서 총 30,126본(총 길이 361,891m)을 설치하였다. 건설용 중장비가 변변치 않았던 당시에는 샌드드레인 시공을 위해서 6mm 두께의 강관을 길이별로 제작하여 케이싱으로 사용하였으며, 슈를 부착한 케이싱을 드롭해머로 타격하여 지중에 관입한 후 버킷으로 케이싱 내에 모래를 퍼붓고, 모래 투입구를 밀폐하여 압축공기(20마력 용량의 컴프레서로 최대 5~6kg/cm² 용량)를 분사하면서 강관을 인발하는 소위 '압축공기식 케이싱법'을 적용하였다. 이 때문에 길이가 20m 이상인 모래 말뚝은 시공하기 어려웠다. 바이브로 해머를 이용하여 케이싱이 자동 관입되고 인발되며, 모래 말뚝 길이 조절이 자유롭고, 관입 저항과 케이싱 내 모래 깊이 측정이 가능한 요즘 장비에 비교하면 매우 열악한 조건이었다고 할 수 있으나, 당시로는 최선의 공법으로 각광받았던 것 같다. 연약층의 특성 파악을 위해서는 1970년 3월~5월에 걸쳐 오거보링, 동적콘관입시험(콘직경 50.8mm, 63.5kg 해머를 75cm 자유낙하시켜 콘 타격 후 30cm 관입에 소요된 타격수 측정), 이동식 원추관입시험(원추각 30°, 선단면적 6.4cm²), 시험굴 조사를 실시하였으며, 원추관입저항인 q_c 를 이용하여 점성토층의 점착력을 $c=q_c/10$ kg/cm² 식에 따라 산정하였다. 당초 배인전단시험을 계획하였으나, 장비의 한계와 지층 조건의 제약으로 2회만 실시하고, 대부분 원추관입시험으로 대체하였다. 실내역학시험으로는 기본

물성시험 외에 직접전단시험 정도를 수행하였으며, 교량가설 예정지점에서는 시추 후 표준관입시험을 실시하였다. 이미 당시에 현재 사용 중인 표 1과 거의 동일한 연약지반 판정기준을 적용하였다. 한편, 당시 하동공구사무소에서는 곤양터널 건너 진교면 간척지대에 적용하는 것으로 설계된 플라스틱매트(네트롱)공법에 대해 우리나라 최초로 시험시공을 실시하였으나, 실제 시공에는 반영하지 않았다. 또한 가는 모래를 사용하여 15cm 두께의 하부 필터층을 포설하고, 그 위에 50cm 두께의 모래 배수층을 포설하는 방식으로 샌드매트(sand mat)를 시공하였다. 연약지반 구간은 원지반 정리 후 약 50cm 두께로 초기 성토한 후 샌드매트를포설하고, 그 위에서 샌드드레인 시공하였다. 성토는 3단계로 나누어 진행하였으며, 각 단계별로 일정 기간 동안 방치하여 압밀을 도모하였다. 성토로 인해 하부지반의 전단파괴가 우려되는 구간은 압성토 공법을 적용하였다. 포장 시기는 잔류침하 예측을 통해 결정하였으며, 개통 후에도 많은 부등침하가 예상되는 구간은 기층과 중간층까지만 시공하고, 개통 후에 잔류침하를 관측하여 적절한 시기에 표층을 시공하는 방법을 사용하였다. 남해고속도로 건설공사 당시에 샌드드레인 시공 구간, 무처리 구간을 포함하여 수개소에서 지반의 전단파괴가 발생하였으며, 이 지점들은 샌드드레인을 재시공하거나, 또는 압성토 공법을 적용하였다.

1976년 6월에 착공하여 1977년 12월에 준공한 대구-마산간 구마고속도로는 프랑스 용역단에서 설계한 호남 남해고속도로와는 달리 미국 용역단에서 설계하였으며, 기존 남해선 연결부까지 약 20km 구간에 연약지반이 분포하였다. 연약지반 구간은 포장 계획고의 120~130%까지 성토하는 여성토공법(surcharge method)과 샌드드레인공법(직경 40cm, 간격 3~6m)으로 당초 설계되었으나, 당시 국내의 장비와 시공기술이 열악하여 샌드드레인의 품질을 확신할 수 없었던 이유로, 샌드드레인공법이 예정되었던 구간은 치환하거나, 샌드매트만을 설치하는 것으로 설계변경하고, 단계성토를 시행하여 공사를 완료

하였다.

1978년 5월에 착공하여 1981년 9월에 개통한 부산-마산간 부마고속도로 건설시에는 샌드드레인공법 대신, 국내 고속도로에서는 처음으로 기성연직배수재공법(PVD, prefabricated vertical drain method, 당시에는 paper drain으로 부름)을 도입하고, 폴리프로필렌(PP) 재질의 지오텍스타일 토목섬유(PP, mat)를 사용하였다. 당시 사용한 PVD용 자재는 외국산인 "castle board drain(폭 100mm, 두께 3mm)"으로서, 사각형 형태로 2m 간격을 유지하며 설치하였다. PVD 공법은 스웨덴의 Kjellman이 1930년대에 마분지(cardboard) 재료를 개발하여 특허를 받은 후로 오랜 동안 개량을 거쳐 1970년대부터 본격적으로 사용되기 시작하였으며, 국내에서는 1975년 창원공업단지(적현단지)에 역시 castle board를 사용하여 적용한 것이 최초이다. PVD 공법 외에도 여성토공법을 함께 적용하였으며, 많은 침하가 예상되는 지점에서는 지중 가설횡단관으로 콘크리트관 대신 파형강관을 적용하였다. 지오텍스타일은 이후 시행된 호남고속도로 확장공사에도 적용되었는데, 1984년 태인 I/C와 동진강 구간에는 국산 PP, 매트를 외국 제품과 비교하는 시험시공을 진행하기도 하였다.

1990년 12월에 착공하여 1994년 7월에 개통한 서해안고속도로 인천-안산간 노선은 전체 구간 27.6km의 23%인 6.4km 길이에 걸쳐 충적층과 준설매립층으로 구성된 연약지반이 분포하고 있어, 이를 개량하기 위하여 국내 고속도로 건설공사 최초로 모래다짐말뚝(SCP, sand compaction pile, 말뚝 직경 70cm, 간격 2.0~2.2m)공법을 샌드드레인(말뚝 직경 40cm, 간격 2.0~3.5m)공법과 함께 적용하였다(그림7). 이 때, 특별시방서상에서는 SCP를 지표 아래 깊이 6m를 기준으로 관입 및 인발 깊이를 조절하도록 명시하였다(이 기준은 고속도로공사 전문시방서에도 반영되었으며, 2000년에 일부 개정됨). SCP 공법은 국내에서는 1980년대 초반 광양제철소 부지 조성 당시 처음으로 소개되었다. SCP 공법 적용은

고속도로 연약지반 구간 개량에 큰 전기를 마련하였으나, 반면에 시공시 주변 지반이 과다하게 교란되는 문제점들을 노출시키기도 하였다. 한편, 서창분기점 내 장수천1교 교대 배면 뒷채움부에 국내에서는 처음으로 EPS 블록을 이용한 경량성토공법을 시험 시공하였다(그림8). EPS 성토공법은 이후 여러 공사에서 문제발생 구간의 대책공법 등으로 설계에 반영되었다. 또한 연약지반 구간 내 구조물 시공 부위는 지반을 충분히 개량한 후 구조물을 축조하는 방법을 적용하였다. 이 밖에도 성토체 하부를 보강하기 위하여 폴리에스테르 재질의 지오텍스타일 토목 섬유(PET mat, 인장강도 15~20t/m)가 PP 매트와 함께 사용되었다. 연약지반 거동 분석과 공사관리를 위하여 체계적인 계측계획이 반영되었다. 그럼에도, 공사 도중 불가피하게 다수의 전단파괴가 발생하였다.

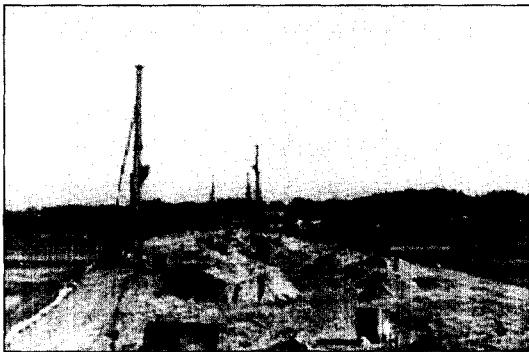


그림 7. 샌드드레인, SCP 시공

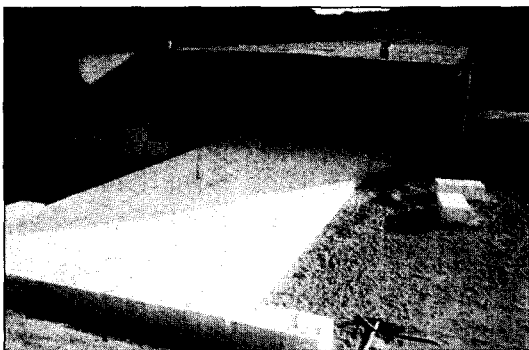


그림 8. EPS 블록 뒷채움 성토

인천-안산간 노선과 함께 착공하여 1995년 12월에 개통한 서창-안양(석수)간 제2경인고속도로는 전체 노선 15.5km의 22%가 충적층, 준설매립층, 쓰레기 매립층 등 연약지반으로 구성되어 샌드드레인, SCP, PVD 공법들이 적용되었는데, 특히, 쓰레기 매립 구간에는 동다짐공법(파운더 무게 16ton, 낙하높이 18m)을 적용하여 당초 15m 두께 지층의 평균 N값을 19에서 26으로 증대시키기도 하였다.

이러한 공법들은 1970년대 후반부터 시작되어 1990년대 중반까지 계속된 호남고속도로와 남해고속도로 확장공사에도 계속 적용되었다. 1991년 11월에 착공하여 1996년 9월에 개통한 경부고속도로 양산-서부산 노선과 남해고속도로 냉정-구포간 노선의 건설시에는 국내에서 처음으로 합성섬유망사로 감싼 4분의 모래말뚝을 동시에 시공하는 팩드레인(pack drain) 공법(설치 간격 1.2~2.3m)을 개발하여 도입하였다(그림 9). 팩드레인 공법은 이후 구마고속도로 옥포-내서간 노선 4차로 확장공사, 서해안고속도로 안산-안중간, 서천-군산간, 무안-목포간 노선에 도 지속적으로 적용되었다. 그리고, 하천이나 바다에서 채취한 자연모래의 대량사용으로 인한 각종 문제를 개선하기 위하여 부순 모래(인공사)를 샌드드레인 재료로 사용하기도 하였다. 양산 일대는 우리나라의 대표적인 연약지반 분포 지역으로 고속도로 시공 도중 대규모의 지반 파괴가 발생하였다.

1996년 12월에 개통한 서해안고속도로 안산-안중간 노선에도 연약지반 구간의 길이가 7.6km에 달하여, 연약층 두께와 성토고에 따라 치환, 선행재하, 샌드드레인, 팩드레인 공법을 적용하였다. 연약층이 두껍고 성토고가 높아 지반 활동이 염려되는 지점에는 SCP 공법을 적용하였다. 인천-안산간 노선과 마찬가지로 연약지반 구간 내 구조물은 지반 개량 후 시공하였다. 교대 구조물 하부지반의 측방유동을 방지하기 위해 홍원1, 3교와 서평택 I/C육교에 EPS 블록 성토공법과 파일슬래브공법(PHC 말뚝 : 직경 500mm, 두께 8mm, 1.8m 간격으로 교대 배면 14m 후방까지 배치)을 시험 적용하였다(그림8). 영동고

속도로-동해고속도로 연결 공사시에는 강릉 일대의 매우 연약한 유기질토층 위에 성토체를 시공하기 위하여 PC 말뚝을 타입하고, 그 두부를 철근으로 서로 엮어 망 모양으로 연결하는 파일네트공법을 시도하였다.

1998년 8월에 개통한 서해안고속도로 무안-목포간 노선은 전체 연장의 12% 가량인 2.8km 구간에 연약지반층이 나타나, 샌드매트와 토목섬유를 포설하고, PVD, 또는 SCP 공법을 적용하였다. 같은 해 10월에 개통한 서해안고속도로 서천-군산간 노선도 총 연장의 45% 가량인 10.6km 구간에 두께 2~23m의 연약지반이 분포하여, 샌드드레인, 팩드레인, PVD, SCP 공법을 적용하였으며, 모래를 사용하는 기존의 샌드매트를 대신할 수 있는 토목섬유 수평배수재를 시험시공하였다.

1995년 8월 착공하여 2000년 11월에 서해대교와 함께 개통한 서해안고속도로 송악-당진간 노선도 총 연장의 40% 가량인 7.2km 구간이 연약지반으로 이루어져 성토고를 낮추어 설계하고, 샌드매트, 토목섬유, 팩드레인공법을 적절히 조합하여 시공하였다. 민자유치사업으로 추진하여 2000년 11월에 개통한 인천국제공항고속도로에도 샌드드레인, 팩드레인, PVD, SCP 공법을 적용하였으며, 역시 민자유치사업으로 추진 중인 천안-논산간 고속도로에도 샌드드레인, SCP 공법과 EPS 성토공법을 적용하고 있다. 현재 건설 중인 서해안고속도로 당진-서천간, 군산-무안간 노선은 선행제하, 샌드드레인, SCP, PVD 공법이 병용되고 있으며, 지오텍스타일 매트와 샌드매트를 대부분 포설하고 있다. 또한 일부 교량 구조물 배면에는 EPS 블록 성토를 진행하고 있으며, 잔류침하로 인한 구조물 균열을 방지하고, 공사기간을 단축하기 위하여 횡단배수관과 횡단 통로 및 수로 압거용으로 파형강관 및 파형강판 구조물, 조립식 프리캐스트 박스형 콘크리트 구조물을 시험적용하고 있다. 서해안선과 경부선을 연결하는 평택-안성간 고속도로도 단계성토와 치환, 샌드드레인공법을 적용하고 있다.

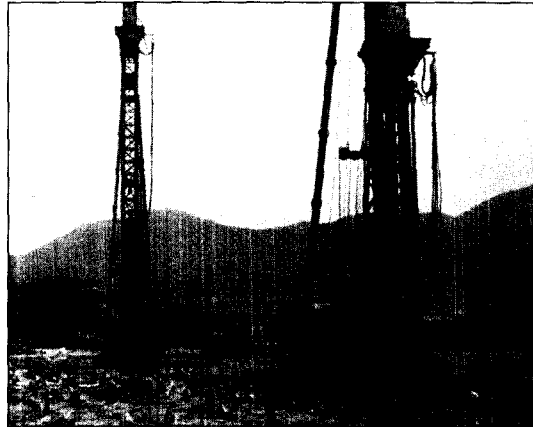


그림 9. 팩드레인 시공 모습

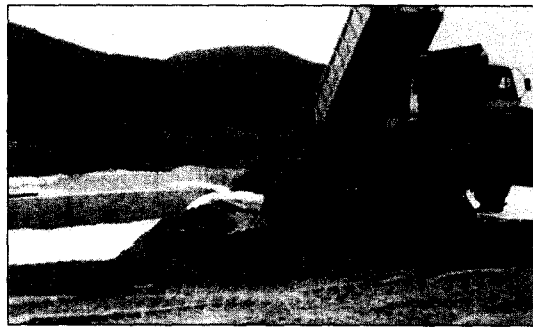


그림 10. 지오텍스타일, 샌드매트 시공

3.2 연약지반의 조사

기존 지반조사 자료, 인근 공사 자료 등을 수집하여 분석하고, 필요한 현장조사를 실시하여 해당 지역의 지형학적 특성 및 지반공학적 특성을 파악한다. 연약한 점성토층의 경우 표준관입시험의 신뢰성이 매우 낮으므로, 가급적 피에조콘관입시험과 배인전단시험 등 현장 원위치시험을 실시하는 것이 좋으며, 이를 통해 지층의 연속적 분포 상태를 파악하고 설계서와 비교한다. 대표적인 지층별로 시료를 채취하여 기본 물성시험 및 실내역학시험을 실시한다. 공사 도중 지반의 이상 거동이 발견될 때에는 사운딩 등 적절한 조사를 실시하는 것이 좋다. 현장시험으

표 4. 연약지반 설계에 필요한 조사 항목과 산정방법

	항목	기호	주요 용도	실무에서 권장되는 산정방법
	지층 분류	-	지층분포 조건 파악	정적콘관입시험, 표준관입시험 + 시추조사
기본 정수	자연함수비	w_n	흙 분류, 상관성	실내, 또는 현장시험
	액(소)성한계	LL(PL)	흙 분류, 상관성	실내시험
	소성지수	PI	흙 분류, 상관성	= LL-PL
	단위중량	γ	흙 분류, 하중 응력 계산	실내 현장시험, 체적-중량 관계식
	초기간극비	e_0		체적-중량 관계식, 비중-함수비 관계식
압밀 정수	압축지수	C_c	침하량 계산	표준압밀시험($e-\log \sigma^c$ 곡선)
	선행압밀하중	σ'_p	압밀 해석	
	압밀계수	C_v, C_h	압밀속도 계산	압밀시험, 현장간극수압소산시험
	투수계수	k_v, k_h	압밀속도 계산	투수시험, 압밀시험 관계식
강도 정수	비배수강도	s_u		현장배인전단시험, 정적콘관입시험 삼축압축시험(UU/CIU/CK ₀ U)
	강도증가율	s_u/σ'_v	압밀 진행시 증가강도 계산	삼축압축시험, PI 등 각종 지수와의 관계식

로는 정적피에조콘관입시험(ASTM D5778), 시추조사와 병행하는 표준관입시험(KS F2318), 현장배인전단시험(KS F2342), 프레셔미터시험, 델라토미터시험, 스웨덴식관입시험, 동적콘관입시험 등을 실시하며, 실내시험으로는 일반 물성시험을 포함하여 삼축압축시험(KS F2346, ASTM D4767), 일축압축시험(KS F2314), 직접전단시험(KS F2343), 압밀시험(KS F2316) 등을 실시한다. 표 4는 지반공학 적 설계와 시공을 위해 필요한 조사 항목과 산정 방법이다.

3.3 시공

공학적 특성이 불량한 연약지반을 개량하는 공법은 물리적, 화학적 및 전기적 공법 등 여러가지가 있으나 경제성, 기술수준, 환경오염성 등을 고려하여 주로 물리적 개량공법이 널리 적용되고 있으며, 점성토 지반에 대해서는 선행재하공법, 연직배수공법, 토목섬유보강공법, 그라우팅공법 등이 주로 사용된다. 최근에는 기존의 개량공법과 병행하여 토목섬유, 강재 등 신소재를 이용한 지반보강재와 경량재의 사용이 늘고 있다. 연약지반 처리공법은 개량 목적, 개량 원리, 지반 조건, 개량 깊이 등에 따라 크게 다짐공법, 선행재하공법, 치환공법, 약액주입공법, 지반보

강공법, 열처리공법, 연직배수공법 등으로 구분할 수 있는데, 이들 공법들은 각각 복합적인 효과를 발휘하는 경우가 많으며, 서로 조합되어 사용되기도 한다. 예를 들어 연직배수공법의 일종인 모래다짐말뚝공법(SCP)은 압밀 촉진 뿐 아니라 지반 보강면에서도 우수한 효과를 발휘하며, 일반적으로 수평배수공법, 선행재하공법과 병행하여 사용된다. 고속도로 건설공사에서 연약지반 구간의 전형적인 토공 단면은 그림 11과 같으며, 그 시공은 일반적으로 그림 12의 단계를 거치게 된다.

여기서는 국내에서 연약지반을 지나는 고속도로 공사 중 토공 구간에 주로 적용하는 가장 기본적인 공법들의 세부 기준들에 대해 소개한다. 이 기준들은 고속도로를 건설하고 관리하는 주체인 한국도로공사에서 제정하여 적용하는 '고속도로공사 전문시방서(2000년 개정)' 및 여타 시방서, 지침 등에 명시되고 있다.

3.3.1 연약지반용 토목섬유(P.E.T. 및 P.P. 매트)

연약지반에 건설하는 성토체의 보강, 장비의 주행성 확보 및 배수층 확보(층분리)를 위해 성토체 하부에 포설하는 폴리에스테르(PET), 및 폴리프로필렌(PP) 재질의 지오텍스타일을 말하며, 사용하고자 하는 PET, PP 매트의 인장강도, 변형률, 투수계수

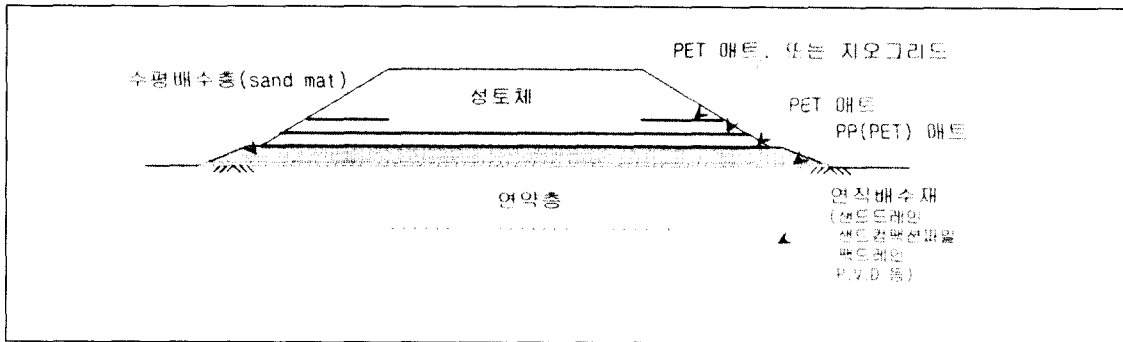


그림 11. 연약지반 성토시 일반적인 시공 단면

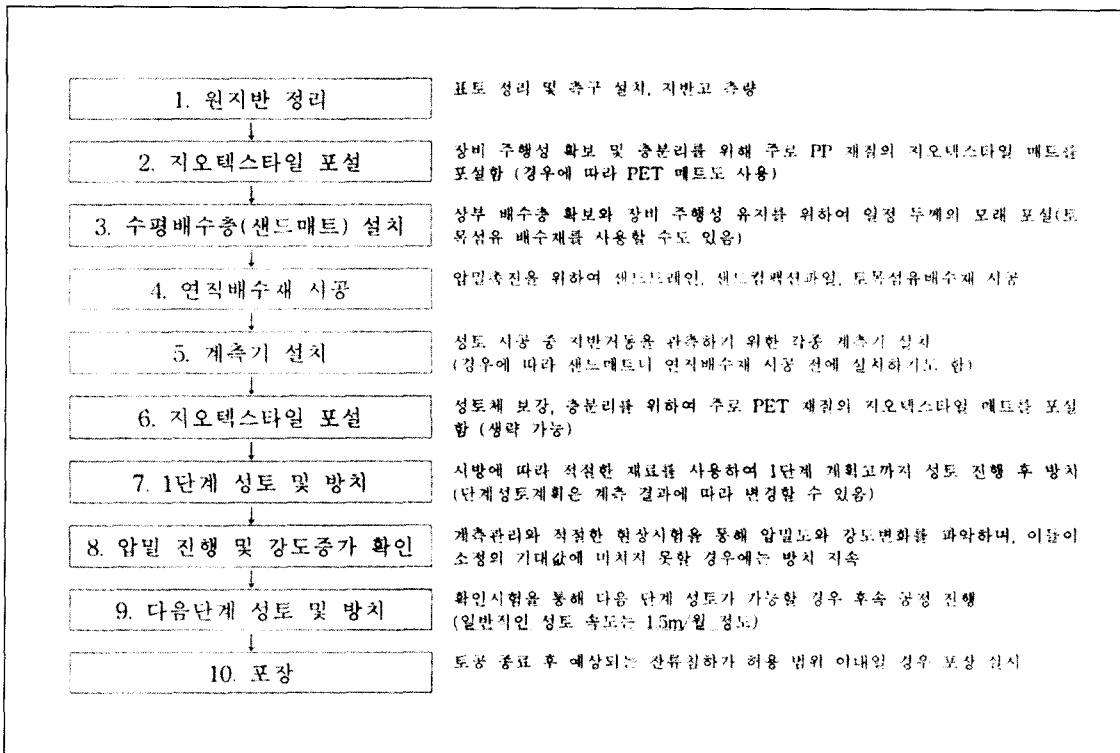


그림 12. 연약지반 성토 시공 단계

기준은 설계 내용과 품질기준(표5)에 부합하여야 한다. 지오텀라일매트를 현장에서 접합하여 연결할 때에는 최대인장변형방향(도로 성토의 경우 도로 폭 방향)과 평행하게 봉합해야 하며, 감독원 승인 아래 일정 길이 이상 단부를 겹치는 방법을 적용할 수

있다. 또한 매트 상단 복토는 골고루 진행하여 특정 부위의 응력 집중을 방지해야 하며, 복토층의 두께가 20cm 미만인 곳은 공사 장비를 통행시켜서는 안 된다. 초벌 성토층에는 쇄석, 자갈 이상의 암석이 포함되어서는 안 된다.

표 5. 고속도로 연약지반 구간에 사용하는 지오텍스타일의 품질 기준

항목	구분	시험규격
주용도	지반 보강(활동 방지), 지지력 증진	배수 및 층 분리
재질	폴리에스테르(PET), 폴리프로필렌(PP), 기타	KS K 0210
최대인장 변형률	30% 이하*	-
인장강도	토목섬유의 인장응력 변형률 특성은 설계 조건에 부합해야 하며, 설계에 명시되지 않은 경우는 인장변형률 10% 이내에서 설계인장강도가 발휘되어야 함.	3ton/m 이상 KS K 0753 (광폭스트립법)
수직 투수 계수	1×10^{-5} cm/sec 이상 (단, 원지반과 샌드매트 사이에포설되는 1×10^{-3} cm/sec 이상)	1×10^{-3} cm /sec 이상 KS F 2128
병합강도	병합 직각 방향 원단 강도의 50% 이상	KS K 0753 적용

* 설계시 별도 명시되었거나, 배수 및 기타 다른 기능을 병행하고자 할 때에는 감독원의 승인을 얻어 조정

3.3.2 샌드매트

샌드매트는 압밀로 배출되는 지중 간극수 배수와 성토층 내 수위 상승 방지를 위한 상부 배수층 역할 및 공사장비의 주행성 확보를 위한 지지층 역할을 하게 된다. 고속도로 건설 공사시 샌드매트에 사용하는 모래의 품질기준은 표6과 같다. 샌드매트의 포설 두께는 통행 장비의 접지압, 배수성능, 기초지반의 압축성 등을 기준으로 결정(일반적으로 50~100cm 가량)하며, 균일한 두께로 포설하되 침하를 고려하여 도로 중앙부에 대하여 적정한 횡단 구배를 갖도록 한다.

표 6. 샌드매트, 샌드드레인용 모래의 품질기준

구분	D ₁₅	D ₈₅	#200세 통과율	투수계수
샌드매트	0.075 ~0.9mm	0.4 ~8mm	15% 이하	1×10^{-3} cm/sec 이상
샌드드레인	0.1 ~0.9mm	1 ~8mm	3% 이하	1×10^{-3} cm/sec 이상

(D_n : 입도분포곡선에서 누적통과율 n%에 해당하는 입경)

3.3.3 연직배수공법 : 샌드드레인, SCP 등

연직배수공법은 우리나라에서 연약지반 구간 고속도로 건설시 가장 보편적으로 사용되는 지반개량공법이다. 이 공법은 사용하는 배수재, 시공 방법에 따라 모래를 사용하는 샌드드레인류와 인공 배수재를 사용하는 기성연직배수재(PVD)공법으로 구분한다. 샌드드레인류의 공법에서는 표 6에 제시된 기준을 만족하는 모래를 사용하며, 다시 샌드드레인, 샌드윅(sand-wick)드레인, 팩드레인 등으로 구분된다. 이외에도 모래를 다지며 시공하는 모래다짐말뚝(SCP)공법과 쇄석을 배수재로 사용하는 암석기둥(stone column) 공법 등도 연직배수공법에 포함시킬 수 있는데, 압밀축진 원리가 샌드드레인과 동일하며, 압밀축진과 지반보강, 침하 감소 등의 효과를 동시에 거두고자 할 때 사용한다. 그러나, SCP 공법 등은 시공시 주변 지반의 과도한 변위를 유발할 수 있으므로, 매우 연약한 지반에서 주변 구조물이나 경작지, 수로가 있는 경우에는 적용에 많은 주의가 필요하다(그림13).

고속도로 건설공사에 사용하는 샌드드레인(SCP, 팩드레인 포함) 시공장비는 시간대별로 자동측정이 가능한 케이싱 파이프 심도계(케이싱 선단 채적 확인), 사면계(케이싱 내 모래 높이 측정), 전류계(바이트로해머 모터 전류 측정)을 갖추어야 하며, 반드시 본 시공에 앞서 연장 100m당 3개소 이상에서 시험 항타(시험시공)를 실시하여 시공 장비 특성, 지반



그림 13. SCP 시공시 주변의 용기 및 균열

조건과 케이싱 관입저항 간의 상관관계(예:N값과 해머모터 전류값 관계 등)를 충분히 파악하여야 한다 (시공순서 그림14, 15).

샌드드레인용 모래말뚝은 설계 심도까지 관입하는 것을 원칙으로 한다. 단, 현장 지반조건이 설계시 예상과 크게 다르다고 판단될 때에는 적절한 추가 지반조사와 시험 시공 결과를 토대로 감독원의 승인을 얻어 관입 심도를 변경하여야 한다. 모래말뚝을 합성섬유망으로 감싸 4분을 동시에 시공하는 팩드레인(pack drain)의 경우는 50m마다 시험항타를 실시하여 관입심도별로 영역을 구분한 후 가장 깊은 곳에서부터 케이싱 길이를 조절하면서 시공하여야 하며, 시공 도중 섬유망이 꼬이거나 손상되지 않도록 주의하여야 한다.

SCP 시공시 케이싱의 관입 및 인발기준은 표7과 같으며, 현장에서 시험시공을 통해 합리적인 대안이 마련되었을 경우에는 이를 대신 적용할 수 있다. PVD 시공시에는 반드시 펜드렐을 사용하는 정적관

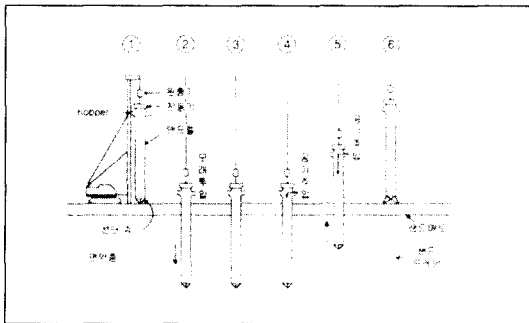


그림 14. 샌드드레인 시공 순서

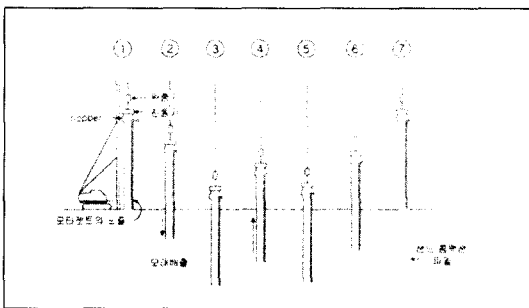


그림 15. 모래다짐말뚝(SCP) 시공 순서

표 7. SCP 시공시 케이싱 파이프 인발 및 재관입 기준

실도	2m 이상	지표~2m
케이싱 인발 높이	3.0m	1.5m
케이싱재관입깊이	2.0m	1.0m

* 심도 0.5m에서 관입 및 인발 1회 추가 실시

입 장비를 사용해야 하며(나타입 금지), 시공 후 일정 시간(예:6개월)이 경과할 때마다 이미 타입된 배수재의 시료를 채취하여 배수성능 시험을 실시해서 품질유지를 확인하는 것이 좋다.

3.4 시공관리

3.4.1 성토 단계별 확인지반조사

설계시 계획된 각 성토 단계를 기준으로 반드시 계측 데이터 분석과 적절한 지반조사를 통해 하부 지반의 압밀도와 강도증가 여부를 확인하여야 한다. 확인조사 시기와 방법은 표8과 같다. 확인조사 결과, 지반의 압밀도, 전단강도, 잔류침하량이 목표 기준을 만족할 때에만 다음 단계 시공을 진행하여야 하며, 그렇지 못할 경우에는 추가 방치, 또는 별도 보강 등 대책을 수립하여야 한다.

3.4.2 뒷채움 구조물의 시공

연약지반에 시공되어 뒷채움을 해야 하는 구조물(교대, 박스형 횡단구조물)을 시공할 경우에는 하부 지반의 압밀침하에 의한 부등변형과 배면 단차 발생은 물론이고, 편재하중에 의한 하부지반의 측방유동

표 8 연약지반 토공부 확인지반조사

구분	조사 시기	조사 빈도	조사 내용	조사방법 (선택)
토공부	- 각 성토 단계마다	대표구간별 1개소 이상	압밀도 평가 강도 평가	1. 계측데이터 분석(필수)
	- 포장 직전			2. 현장시험 - 정적관입시험 / 현장배인전단시험 - 표준관입시험 (실내시험 병행) - 기타원위시험
구조물부	- 터파기 (뒷채움) 직전	구조물당 1개소 이상	압밀도 평가 강도 평가	3. 실내시험 : 일·삼축압축시험

(lateral flow) 및 이로 유발되는 구조물의 측방이동에도 대비하여야 한다. 상부구조물의 측방이동에 의해 교량 슈의 파손 및 슈받침 탈락, 상판 신축이음장치 기능 저하 및 파손, 교량 주형과 교대 흙벽의 접합, 교대 기초의 과다 변형 및 파손 등이 발생할 수 있는데, 적절한 해석과 경험식 사용으로 지반의 측방유동 가능성을 판정하여야 한다. 말뚝 기초를 시공한 경우에는 주변지반의 침하에 의한 부마찰력 뿐 아니라, 측방유동압에 대해서도 기초의 안정성을 검토해야 한다.

연약지반에 시공되는 교대, 통수로 횡단구조물 등 상부구조물들은 가급적 지반개량을 선행하고 터파기 후 시공한다(그림16). 교대, 또는 특별한 횡단구조물의 경우에는 터파기 후 구조물 시공에 앞서 말뚝을 시공하게 된다. 일반적으로 교대부의 연약지반 처리는 공기에 절대적인 영향을 미치므로 최우선적으로 시행하며, 문제 발생 우려가 있는 곳에서는 가급적

교대 전면부 앞채움을 병행하고 교대와 지반의 변위를 관측할 수 있는 계측기를 설치하여 관리한다. 또한 구조물 기초 시공을 위해 원지반 아래까지 터파기할 때에는 굴착 배면이 붕괴되지 않도록 적절한 토류벽 시스템을 구축하여야 하며, 지하수위가 높고 실트나 모래 함량이 많을 경우에는 굴착면의 차수 대책도 강구해야 한다.

최근에는 하부지반의 변형에 따른 상부 구조물의 균열, 급격한 단차 발생을 방지하고, 공기단축을 위해서 아연도금된 파형강판(표9), 또는 파형강판(표10) 구조물을 횡단 지중구조물(통·수로, 배수관)로 활용하고 있다. 특히 파형강판 지중구조물은 주름 성형과 아연도금을 통해 휨강성, 내력 및 내구성을 향상시킨 강판(두께 2.7~7.0mm, 표준파형 150mm 50mm)을 볼트로 연결하여 설치함으로써 강판의 강성, 주변 뒷채움 지반과의 상호작용을 통해 하중을 지지하는 연성구조물이다.

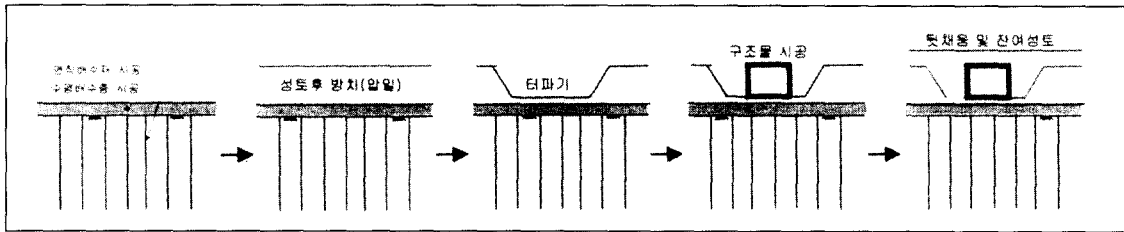


그림 16. 연약지반 구간 횡단구조물의 일반적인 공정

표 9. 고속도로에 적용한 파형강판 통로 구조물 단면도 (조성민 외, 2000)

크기	S=6.9, R=4.8, L=62.2, 강판 두께=4.0mm	S=R=6.3, L=39.8, 강판 두께=4.0mm
설계 단면 및 계측 위치	<p>개단면 : 높은 아치형(high profile arch type)</p>	<p>폐단면 : 원형(round type)</p>

표 10. 성토체 중 횡단 지중배수관으로 사용하는 파형강관의 제원

기호	치수(mm)			기계적 성질(kgf/mm ²)			도금량(g/m ²)
	파의 피치	파의 깊이	굴림반지름	항복점	인장강도	연신율	
1R, 1RS	68.0	17.5	17.5	21이상	28이상	20%이상	600(양면 기준)
3RS	76.2	25.4	17.5				

표 11. 계측기 설치시 주의사항

계측기	설치 및 측정시 유의 사항
지표침하판	<ul style="list-style-type: none"> • 원지반 또는 PP 매트 상부를 노출시켜 매설 후 다짐 • 침하봉과 보호관의 연직도 유지 및 적절한 재질의 보호대, 보호관, 뚜껑 사용 • 계측을 위해 설치한 기준점(BM)의 변동 및 이동 여부를 수시로 확인할 것 • 성토고 증가에 따른 침하봉 연장, 보수 및 재매설시 반드시 보정 실시
층별침하계	<ul style="list-style-type: none"> • 매설전 해당 지점의 정보(층 두께, 지층 등)를 파악하여 설치위치 결정 • 회전수세식 장비를 이용하여 굴착 • 지지층(풍화암 1m 이상)은 분명한 부동점이 되도록 그라우팅 등 실시 • 설치 후 소자 심도 확인 • 지표침하판과 동일한 빈도로 계측 • 성토에 따른 보호관 연결시 반드시 기준값 보정 실시
경사계	<ul style="list-style-type: none"> • 경사계 설치 전에 측구를 먼저 시공해야 함 • 케이싱 선단은 풍화암층 1.5m 이상까지 관입시켜 확실한 부동점 확보 • 케이싱이 지반과 완전히 밀착하도록 수차례에 걸쳐 그라우팅 실시 • 케이싱의 홈과 성토체 중, 횡단이 전 심도에 걸쳐 일치하여야 함 • 성토 이전에 수차례 반복측정으로 초기값 설정 • 케이싱 내 이물질 투입을 방지하고 동결로 인해 케이싱이 파손되지 않도록 조치 • 케이싱의 변형이나 유동 여부를 수시 확인
간극수압계	<ul style="list-style-type: none"> • 지반조사 결과를 검토하여 매설 위치의 지층조건 확인(반드시 점성토층 내 설치) • 설치를 위한 천공시 회전수세식 장비를 사용하여 지반교란 최소화 • 반드시 지하수위계와 병행하여 측정 • 성토 이전에 반복측정으로 초기값을 설정하고 해당 지점의 정수압과 비교 • 지표침하 등을 고려하여 측정 케이블의 여유 확보
지하수위계	<ul style="list-style-type: none"> • 성토체의 영향을 받지 않도록 성토체로부터 충분히 이격시켜 설치 • 회전수세식 장비로 약 5m 까지 천공하여 설치

3.5 계측관리

연약지반 공사시에는 철저한 계측관리를 통해 설계를 검증하고, 이를 토대로 공정을 진행하여야 한다. 일반적으로 계측관리는 침하량 측정과 예측을 위한 침하관리와 지반의 활동 방지를 위한 안정관리로 구분하며, 그 결과를 반드시 시공관리에 반영하여야 한다.

계측관리의 핵심인 신속하고 정확한 측정과 분석을 위해서는 계측기 선정과 설치에서부터 많은 주의를 기울여야 한다(표11, 12). 성토 진행시 성토체와

하부지반의 거동을 분석하기 위해 필요한 항목별로 계측기를 설치하여 관측하며, 성토고의 변화도 반드시 함께 측정해야 한다. 계측기는 설치되기 전에 반드시 성능 및 내구성, 교정(calibration) 검사를 필하여야 한다. 계측기 설치시에는 주변 지반이 과도하게 교란되지 않도록 주의하며, 설치 후에는 성토공정이 진행되기 전에 반드시 안정된 초기값을 확인하여 기록하여야 한다. 계측기 주변에는 반드시 보호장치를 하고 안내문을 게시하여 손상을 방지해야 한다. 방대한 계측 자료는 자체적으로 개발한 전문 프로그램을 이용하여 관리하고 있다(그림17, 18).

표 12. 계측 빈도

측정 항목	성토 도중 성토 후 1개월까지	성토 후 1~3개월	성토 후 3개월 이후	준공 후
지반 침하량, 지중형변위량 간극수압, 지하수위, 토압 기타 항목	2회/1주	1회/1주	1회/2주	1회/3개월

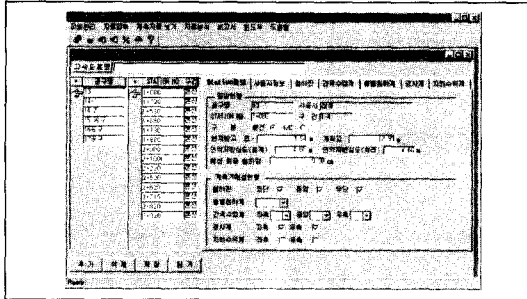


그림 17. 계측관리 프로그램의 활용

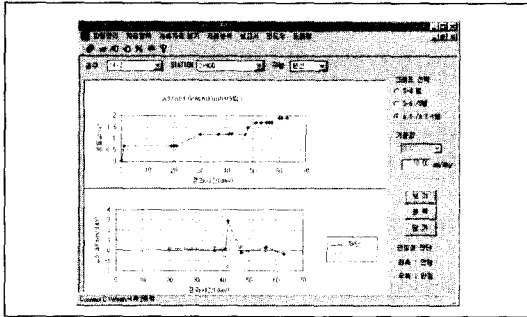


그림 18. 안정관리 사례

는 활동에 대한 지반의 안전율은 증가하게 되므로 안정상의 문제는 배제할 수 있으나, 개통 후 발생하는 지반의 잔류침하는 완전하게 제거하기가 현실적으로 어렵기 때문이다. 그림19는 성토가 개시되는 시점부터 공사 완료 후 임의기간까지의 침하를 개념적으로 설명하고 있는데, 설계시 일반적으로 예측할 수 있는 침하는 이 그림에서 'B' 곡선에 해당하며, 이에 반하여 실제 침하는 'D' 곡선과 같이 발생하게 된다.

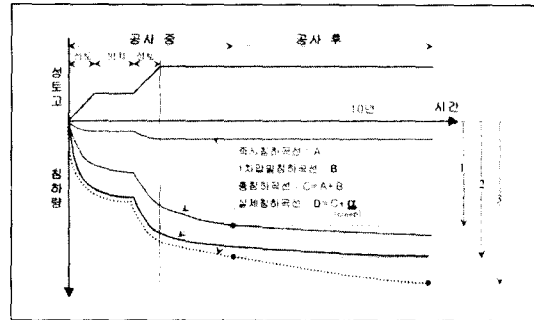


그림 19. 점성토층의 하중 침하 개념도

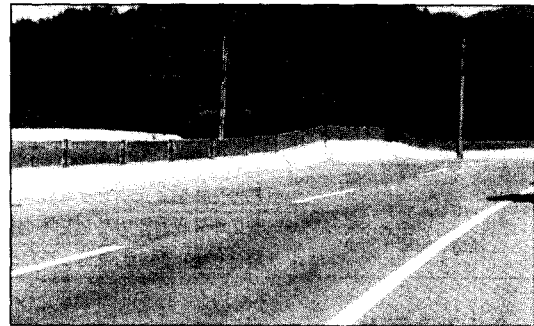


그림 20. 개통된 고속도로의 침하

4. 연약지반 구간 고속도로의 유지관리

4.1 개통 후 발생하는 문제점

예산과 공사 기간이 제한된 조건 아래에서 연약지반 구간에 건설된 고속도로는 시공의 건설성 여부와 무관하게 준공 후에도 오랜 시간 동안 다소의 침하 발생이 불가피할 수 있다. 포화 점성토층의 특성상 일단 재하가 완료되면 특별한 하중조건 변화가 없

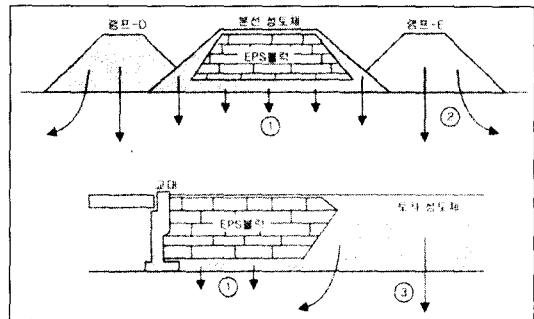


그림 21. EPS 블록 뒷채움 부위의 침하

따라서, 연약지반 처리를 아무리 훌륭하게 완수 하더라도 토질역학적 특성에 기인한 하부지반의 장기적인 침하 거동을 예측하는 데에는 기술적인 한계가 있을 수 밖에 없으며, 이는 우리나라에만 국한되는 문제는 아니다. 그림 20은 개통된 고속도로의 실제 잔류침하 사례를 단적으로 보여주고 있으며, 그림 21은 연직배수공법으로 지반개량을 하고, EPS 블록을 이용한 경량성토를 진행했음에도 잔류침하가 발생할 수 있음을 보여준다. 이러한 점 때문에 연약지반에 건설된 구조물은 건설 당시 뿐 아니라 유지관리에도 만전을 기해야 하며, 이 부분의 다양한 기술 개발이 필요한 시점이다.

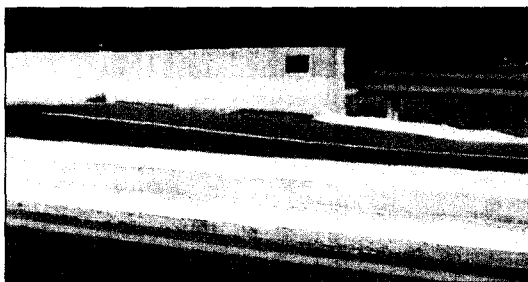


그림 22. 구조물부와 뒷채움의 부등침하

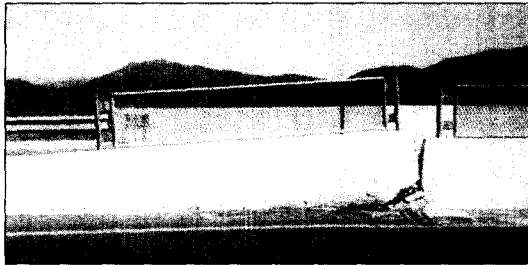


그림 23. 부등침하에 의한 중앙분리대 파손



그림 24. 저성토 구간 포장체 균열

유지관리상 주로 문제가 되는 부분은 토공부와 구조물의 접속부로서, 부등침하에 의해 단차가 생기고 포장이나 부대 구조물들이 파손된다(그림 20, 22, 23). 또한 차량통행이 빈번한 저성토부에서는 교통하중의 전달과 노체 및 노상의 약화 현상으로 침하와 포장 균열이 유발될 수 있으며(그림 24), 기존 도로 옆으로 램프나, 신규 도로가 가설될 경우에도 확폭부 쪽으로 성토체가 기울어져 침하와 포장체 파손이 발생하기도 한다(그림 25, 26). 편절편성부, 또한 경사지층부에 시공된 구간 역시 유지관리상 취약 지점이 된다(그림 27).



그림 25. 부등침하로 인한 포장면 침하 및 균열

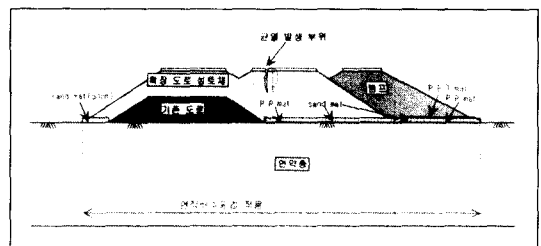


그림 26. 확폭부 시공에 의한 침하와 균열 발생

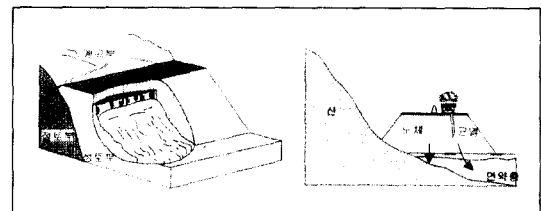


그림 27. 편절편성부, 경사지층에서 발생하는 문제 사례

4.2 유지관리 현황

한국도로공사에서는 노선 준공 후 별도의 유지관리부서에서 고속도로의 구조적 안정성 확보와 기능유지를 위한 업무를 담당하게 되며, 연약지반 구간에 대해서는 개통 후에도 지속적으로 계측을 실시하여 잔류침하 현황을 관리하고 포장체를 비롯한 주변 구조물의 상태를 점검하며, 이를 장기적인 유지관리 계획 수립에 반영하고, 또한 차후 공사관리에 필요한 기술적 자료를 축적하고 있다.

고속도로가 개통된 후에도 건설 당시 설치되어 이관된 계측기와 새로 설치된 측점을 이용하여 교량, 횡단 암거 등 구조물부를 중심으로 일정 간격마다 연 2회 이상씩 침하량을 관측하고, 포장과 구조물의 상태를 면밀히 점검하여, 필요할 경우 일상적인 보수를 시행한다. 통상적인 유지관리 범위를 벗어나는 문제 발생시에는 도로연구소, 또는 외부 전문기관(업체)의 기술지원을 통해 대책을 수립하고 해결한다. 연약지반 구간 고속도로의 유지관리는 연간계획에 의거하여 주로 육안 점검, 침하량 계측, 구조물 변위 관측과 포장 보수, 구조물 보수 등으로 이루어지며, 토공부에서 과다한 침하로 도로 기능에 지장이 초래되는 경우와 구조물 뒷채움부에서 5cm 이상의 침하가 발생하는 경우에는 포장단차 보수와 덧씌우기, 배수 시설 보완 등을 실시하며, 필요할 경우에 그라우팅, 또는 언더피닝 등을 시행한다.

포장 덧씌우기와 팻칭은 가장 빈번하게 이루어지는 작업으로서, 하부지반의 침하로 덧씌우기 반복 후에도 지속되는 균열에 대해서는 그림 28, 29와 같은 대책을 적용한다.

그림 27에서와 같이 하부 연약층 두께가 위치마다 다르거나, 특히 편평성부에 노체가 시공된 경우에는 침하 뿐 아니라 집중강우 등에 의해 고속도로 제방 자체의 안정성에 문제가 발생할 수 있다. 이 때에는 여러 가지 보강공법을 적용할 수 있는데, 통상적으로 억지말뚝공법(그림 30)이나 쏘일네일링공법(그림 31)을 시공한다. 이 때 억지말뚝은 지반 활동으로

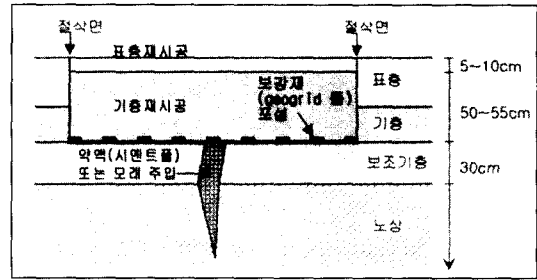


그림 28. 포장체 균열 보수 방안 1

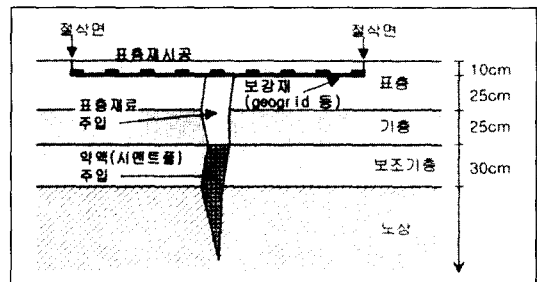


그림 29. 포장체 균열 보수 방안 2

유발되는 모멘트, 전단력 등에 저항할 수 있는 재질과 규격을 가져야 하며, 활동면 아래로 충분한 깊이까지 근입시켜야 한다. 또한 말뚝 관입시 지반교란을 억제하고, 암성토층과 암반층에서 관입성 향상을 위하여 천공 후 설치하는 것이 좋다. 쏘일네일링공법은 사면 및 굴착면에 대한 원위치 보강공법으로서 인장력, 전단력 및 휨모멘트에 저항할 수 있는 보강재(주로 25mm 철근 사용)를 프리스트레싱 없이 비교적 촘촘하게 지중에 삽입한 뒤 숏크리트 등으로 전면판을 설치하여 원지반의 전체적인 전단강도를 증가시키고 변위를 억제하게 된다. 공법의 원리상 네일은 토사층에 설치하는 것이 일반적이나, 절성 경계면을 지나 절토부 암반까지 충분히 근입시킬 수도 있으며, 네일의 길이와 설치 간격은 설계시 해석을 통해 결정하도록 한다. 노체 변형으로 유발된 노면 균열부는 시멘트 밀크 등으로 충전하고, 팻칭, 또는 그림 28, 29의 방법을 적용한다.

연약지반에 시공되는 대부분의 구조물들은 말뚝기초로 지지하는 방식으로 설계, 시공하고 있으나, 일부 교대와 통수로용 암거는 직접기초 방식으로 시

공하는 경우가 있어 개통 후 불가피한 부등침하 등으로 구조물 내에 균열이 발생하는 등의 문제가 생길 수 있다. 이 때에는 압력그라우팅공법에 의한 지반보강을 실시할 수 있으나, 시공 도중 주변 지반 및 인접 구조물에 미치는 영향을 배제하기는 어려우며, 또한 그라우팅 직후 일시적으로 주변 지반의 전단강도가 저하하여 구조물의 추가적인 변위가 발생할 가능성이 있으므로 주의가 필요하다. 그라우팅공법을 실시할 때에는 가급적 인근 지반에서 시험시공을 통해 시공 중 주변 지반에 미치는 영향을 파악하고, 주입 직후부터 고결 시점까지 지반 강도의 변화 정도와 그에 따른 상부 구조물의 안정성 여부를 평가하여야 하며, 시추 조사를 통해 고결체의 직경을 확인하여야 한다. 이미 시공이 완료된 구조물의 하부 지반 보강에는 그라우팅공법 외에도 그물식 뿌리말뚝(reticulated root piles, RRP) 공법을 적용할 수 있다. 이 공법은 가운데에 보강재를 삽입한 소구경 콘크리트 말뚝(φ 75~250mm로서, 나라에 따라 micropiles, pin-piles, minipiles, root-piles, pali radice 등으로 부름)을 적절한 각도로 지중에 타설하여 나무 뿌리와 흙이 일체로 외력에 저항하는 원리를 모사하게 하는 것으로서, 모든 종류의 흙에 대해 적용이 가능하고, 작업공간의 제약이 거의 없으며, 특히 불안정한 지반에서도 부가적인 응력을 유발하지 않으며 소음이나 진동이 거의 없어 구조물에서 근접시공이 가능하다.

일반적으로 측방유동 현상은 흙의 전단변형과 관련이 있기 때문에 안정된 상태에서 시공이 종료되면 압밀 침하가 지속되더라도 재발하지는 않으나, 시공 후 교란에 의한 지반강도 손실이 있거나 상부 하중 조건이 달라질 경우에는 기초 구조물과 상부구조물에 영향을 줄 정도로 문제를 유발시키기도 한다. 이러한 경우에는 하부지반에 대한 별도의 보강이 필요하게 되며, 또한 빔, 교좌장치 등을 점검하여야 한다. 교대 변위로 교대와 빔이 맞닿은 경우에는 구조적 안정성을 해치지 않는 범위 내에서 교대측 빔과 파라펫(parapet)의 일부를 절삭하는 등의 방법으로 간격

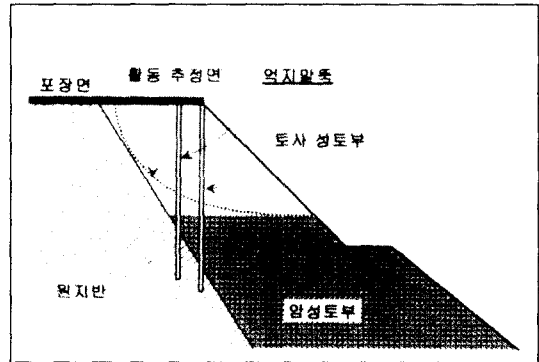


그림 30. 역지말뚝공법에 의한 보강

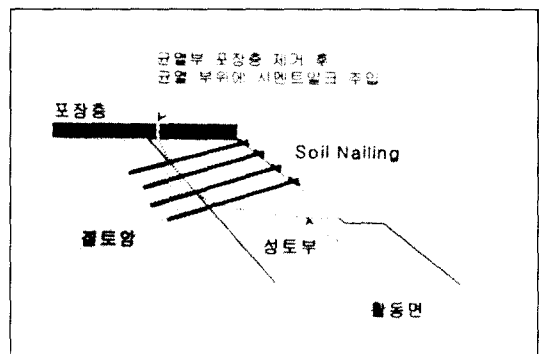


그림 31. 쏘일네일링공법에 의한 보강

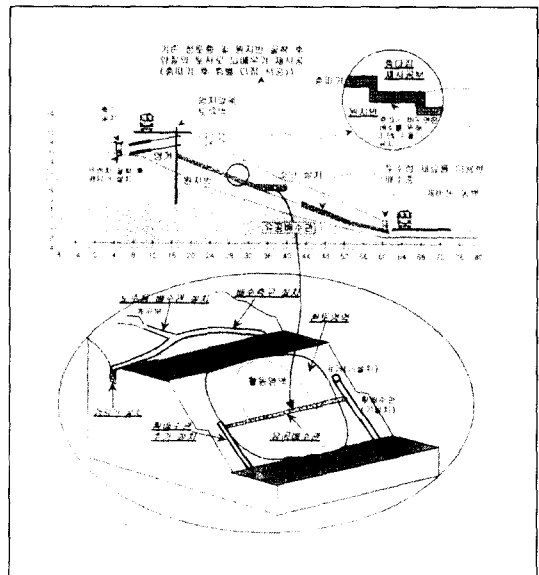


그림 32. 편질편성부에 시공된 고속도로의 보강 후 관리 사례

을 유지하도록 하며, 간격 확보 후 1년 이상 교대 배면의 침하와 구조물의 변위를 계측한다. 교차장치역시 정해진 유격을 만족할 수 있도록 보수하며, 교대 전면부의 보호용 콘크리트 블록도 재정비한다.

그림33은 그림21에서 언급한 문제에 대한 대책 적용 사례로서, 소성화된 상층부의 EPS 블록은 재시공하였다. 그림34는 시공 당시 도로 제방과 건물의 안정성을 확보하기 위하여 압성토를 실시하고 지속적으로 관리하는 사례이다.

한국도로공사에서는 효과적인 유지관리를 위하여 관할 부서에서 설계 및 시공 당시 획득한 모든 지반조사 성과와 계측 결과를 인계받아 관리하고, 특히, 시공 중 침하나 안정상의 문제가 발생한 지점에 대해서는 별도의 관리대장을 작성하여 활용하도록 할 계획이며, 이를 위하여 현재 구축 중인 포장관리시스템에 연약지반 구간에 대한 항목을 별도로 포함하는 것을 추진 중이다.

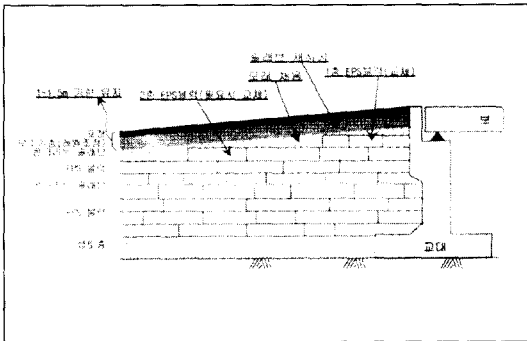


그림 33. EPS 뒷채움 교대의 개통 후 관리대책 사례

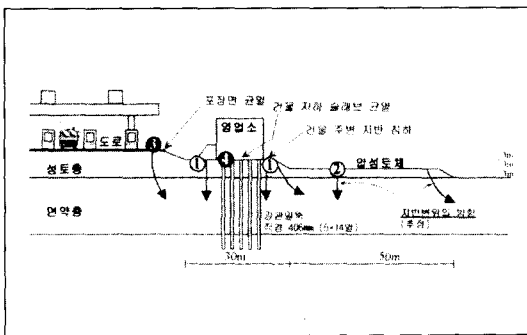


그림 34. 압성토체 관리를 통한 고속도로 영업소의 안정성 확보

표 13. 개통 중인 고속도로의 시공 후 잔류침하 현황

노선명	총연장 (km)	준공일	연약층 심도(m)	잔류침하 측정개소	잔류침하량 (cm)	덧씌우기 최대빈도
서해안 (인천~안중)	72	94. 12	2~17	46	2~29	4
		96. 12	2~10	34	0~4	-
서해안 (서천~군산)	23	98. 10	2~23	12	3~4	2
제2경인선	16	94. 11	4	29	2~4	-
구마선	82	95. 12	5~24	272	0~36	2
남해선 (지선 포함)	191	96. 6	4~24	195	0~50	7
부산-대구선 (지선 포함)	17	96. 6	5~46	149	0~40	7

표13은 1994년 이후 개통된 주요 고속도로의 연약지반 구간에서 발생한 잔류침하량과 덧씌우기를 시행한 최대빈도를 정리한 것이다. 고속도로 전체 구간 중 가장 많은 침하가 발생한 노선은 남해고속도로로서, 1992년도 확장 개통 후 약 99cm의 침하가 발생하였다.

참고로 서해안고속도로 개통 노선 중 연약지반 구간의 보수에 소요된 비용은 약 2억원 가량(1999년까지)으로 동 노선의 전체 유지관리비용의 1% 미만이다. 도로의 유지관리는 교통량, 중차량 구성비 또는 지형·지반 조건 등 다양한 환경요인과 관련되어 유지보수비의 정확한 예측은 곤란하나, 서해안고속도로 전체 연장 353km에 대한 향후 10년간 도로 보수비는 약 280여억원 정도로 예상된다.

5. 맺음말

이 글에서는 고속도로 건설 공사에 적용된 공법들을 중심으로 연약지반 처리 기술의 현황, 공법별 시방기준과 유지관리 실태를 살펴보았으며, 특히, 고속도로 건설 시기별로 변천되어 온 국내 연약지반 관련 기술을 역사적으로 조망하였다. 서술의 범위가 제한되어 있고, 일부 내용이 누락되어 있음에도 불구하고, 연약지반 기술의 통시적 고찰과 고속도로 노선별 연약지반 현황, 연약층 심도, 적용 공법의 종류,

노선별 잔류침하 내역 등은 관련 기술자, 연구자들에게는 소중한 자료가 될 것이다.

국토 방방곡곡을 연결하며 국가경제의 대동맥 역할을 하는 고속도로는 토목기술의 집적체로서 우리나라 건설산업과 관련 기술 발전을 주도해온 산실이라고 할 수 있으며, 새천년에 완성한 장엄한 서해대교는 우리나라 토목기술의 새로운 도약을 위한 또 한번의 계기가 될 것이다. 한국도로공사는 연약지반을 지나는 고속도로의 건설과 관련한 설계 및 시공법을 개선하고, 효과적인 유지관리 방안을 수립하기 위하여 관련 학계 및 산업계와 계속 협력해나갈 것이며, 특히 새로운 기술과 공법의 개발과 도입 및 그 보급에 더욱 매진할 것이다.

참고문헌

1. 조성민(1998), 국내 연약 점성토 지반의 성토 재하시 변형특성 분석, 서울대학교 대학원 박사학위논문
2. 조성민, 이학구, 김경석(1999), 고속도로 건설에 사용되는 토목섬유 현황과 개선사항 고찰, 토목섬유학술발표회, 한국지반공학회 토목섬유기술위원회
3. 조성민, 김홍중, 김경석(2000), 파형강판을 이용한 고속도로 횡단구조물의 시공, 대한토목학회 학술발표회 논문집
4. 한국도로공사(1974~), 건설지/고속도로지/한국도로공사 30년사
5. 한국도로공사(1992), 도로설계요령 : 토공 및 배수 편
6. 한국도로공사(1999), 연구보고서 : 고속도로상의 지반특성 평가 및 정보화 연구
7. 한국도로공사(2000), 고속도로공사 전문시방서 : 토목편

터널 기술 위원회 원고모집 안내

터널 기술위원회(위원장:이인모)는 오늘 4월 27일(금) 「공사중 터널의 사고 사례 발표회」를 갖기로 하였습니다. 터널의 공사중 사고 사례와 관련한 원고를 모집하오니 회원 여러분의 많은 참여를 바랍니다.

- ☐ 주 제 : 공사중 터널의 사고 사례
- ☐ 초록 마감 : 2001년 4월 1일
- ☐ 원고 접수 마감 : 2001년 4월 14일(토)
- ☐ 일 자 : 2001년 4월 27일(금)
- ☐ 장 소 : 고려대학교 공과대학 강당
- ☐ 문의 및 접수처

박광준(대정건설턴트)

tel : 02-449-8285 e-mail : cdaejung@unitel.net