

# 낙동강 델타점토 지역의 고속도로 건설



**박 명 득**  
한국도로공사 냉정부산건설사업단 단장  
(gudtjrzzang@ex.co.kr)



**김 종 인**  
한국도로공사 품질기술팀장



**김 국 한**  
한국도로공사 품질관리차장



**이 원 군**  
한국도로공사 토질과장

## 1. 냉정-부산 건설사업 개요

본 과업은 남해고속도로 냉정-부산 구간과 남해 제2지선의 이용교통량이 교통용량에 근접하고, 중앙고속도로 대구~부산 구간이 개통(2006년)하여 중앙고속도로 대저~대동, 중앙선의 지선 이용교통량 증가 및 해당노선의 차로수 불균형에 따른 교통 지·정체가 발생함에 따라 남해고속도로 냉정~부산 구간의 기존 4차로를 6~8차로로 확

장하고, 남해선(동김해IC와 북부산영업소 사이)과 중앙선의 대동JCT를 연결하는 신설노선을 4차로로 계획하여 교통 지·정체를 해소하고, 장래교통수요에 대처하고자 하는데 목적이 있다.

한국도로공사 냉정부산건설사업단은 현재 고속국도 제10호선, 104호선, 551호선의 확장 및 신설공사를 담당하고 있고, 사업개요 및 노선도는 표1과 그림1에 나타내었다.

표 1. 사업 개요

연 장	53,28km(확장43,36km, 신설9,92km)	
총사업비	1조 3,578억원 (공사비 1조 812억원, 용지비등 2,766억원)	
사업기간	2008. 12 ~ 2013. 12	
주요 시설	출입 시설	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 분기점 4개소(냉정, 김해, 대저, 대동)</li> <li>• 나들목 7개소(서김해, 동김해, 장유, 가락, 서부산, 물금, 남양산)</li> </ul>
	사업효과	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 부산 경남지역 교통혼잡 해소를 물류비용 절감</li> <li>• 노선 선형 불량구간 개량으로 교통사고 감소</li> </ul>



그림 1. 노선도

## 2. 사업구간 지반특성

본 사업구간은 낙동강의 하구에 위치함에 따라 일부 구간을 제외하고는 폭넓고 두텁게 연약지반이 분포하고 있는데, 이는 그림 2와 같이 ‘낙동강 델타점토 지역’이라는 명칭으로도 널리 알려져 있다.

낙동강 주변 연약지반은 『바다에 떠있는 배』처럼 연약한 지반에 형성된 섬과 같아 광범위하고 깊은 심도의 연약층으로 이루어져 있다. (연약층 심도 : 낙동강 주변 53m, 서해안 25m) 또한 고압축성의 초연약층으로 예민비가 크고, 상당한 양의 장기침하가 우려된다.

박성재(2004), 권기호 등(2006)에 따르면 낙동강 하구는 오랜 시간동안 낙동강 상류에서 운반되어 퇴적된 많은 양의 세립토로 이루어져 있으며, 충적층의 두께가 두껍고 강도는 낮으며 높은 압축성을 보인다. 점토층은 정규압밀

상태이고 퇴적층의 두께는 지표면에서 약 25m~75m 내에 분포하고 있으며, 점토의 토질 특성은 표2와 같다.

이러한 대심도 연약지반에 고속도로를 건설함에 따라 표3처럼 연약지반 최대심도 53m, 최대 예상침하량 5.3m, 기존도로 최대 예상 연동침하량 0.5m 라는 열악한 공사조건을 가지게 되었다.

표 3에서 연동침하량, 확장공사 시 확장구간 성토로 인한 하중의 증가로 기존도로에 변형이 발생하는 것으로, 도로의 주행성 및 안정성이 저하되고 이용객의 안전을 위협할 수 있어 철저한 관리가 필요하다. 연동침하의 기본 개념은 그림 3에 나타내었다.

앞서 설명한 바와 같이 연약지반은 안정성이 취약하여 면밀한 관리가 이행되지 않을 경우 비용 및 공기 측면에서 상당한 난관에 봉착할 수 있다. 서해안 고속도로 건설 중 발생한 전단파괴 사례를 그림 4에 나타내었다.

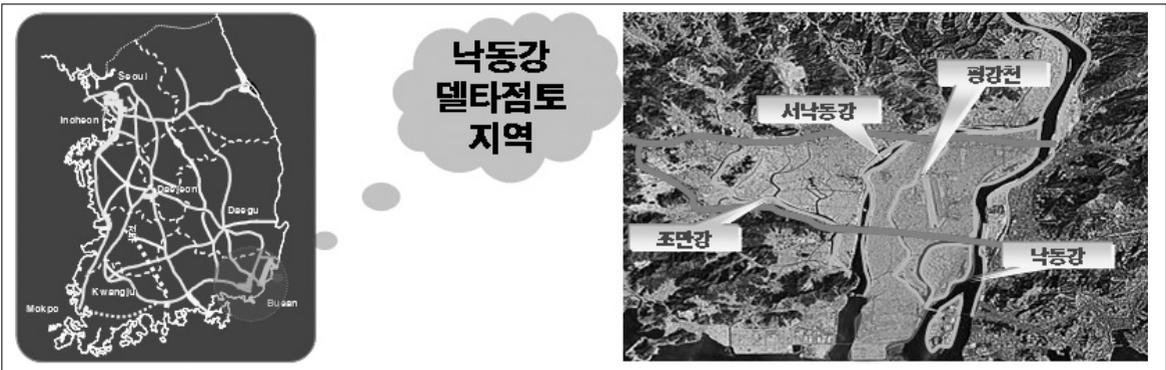


그림 2. 낙동강 델타점토 지역

표 2. 낙동강 하구지역 토질 특성

항 목	범 위	평균값
함수비	4~75%	44%
전체단위중량	1.5~2.2t/m <sup>3</sup>	1.68t/m <sup>3</sup>
No.200체 통과량	10~100%	84%
비중	2.54~2.75	2.67
액성한계(W <sub>L</sub> )	20~82.5%	45%
소성한계(W <sub>p</sub> )	10~58%	25%
흙의 분류	CL~CH	CL
활성도	0.1~1.5	0.75

표 3. 공구별 연약지반 현황

공구	최대심도 (m)	최대 예상침하량 (cm)	예상 연동침하량 (cm)
1	18	145	27
2	25	267	24
3	37	515	23
4	53	537	55
5	37	203	35
6	32	375	3
8	43	80	27

1) 하천이 바다로 흘러들 때, 유속이 저하되면서 토사를 퇴적시켜 형성된 지역

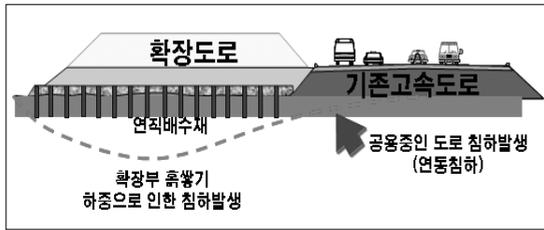


그림 3. 연동침하 개념도



그림 4. 서해안고속도로 전단파괴 사례

### 3. 연약지반 개량 공법

당 지역은 18 ~ 53m의 대심도 연약지반이 넓게 분포하고 있는 지역으로 계획고 성토에 따른 설계침하량은 145 ~ 537cm 에 달한다.

따라서 공사기간과 경제성 등을 종합적으로 감안하여, 연직배수공과 재하를 통한 압밀축진이 기본적인 설계개념으로 적용되었으며 연직배수공의 배수재로는 일반적인 Plastic Board Drain(이하 PBD) 등이 사용되고 있다.

고속도로 횡단구조물 하부의 경우에는 잔류침하저감 및 안정성 증대 차원에서 Sand Compaction Pile(이하 SCP)공법이 적용되었고, 기존도로에 인접한 확장구간의 경우 기존도로의 안전성 확보를 위하여 타입이 아닌 오거에 의한 굴착 후 모래다짐말뚝을 형성하는 방식의 저진동 무소음 SCP공법이 적용되었다. 이때 대심도 시공이 가능한 해상부 SCP공법과는 달리 국내 육상부 SCP공법의 적용 최대심도는 25~30m 정도이므로 시공한계보다 연약



그림 5. 저진동 무소음 SCP시공 전경(4공구)

층의 심도가 깊은 지역의 경우에는 하부 미개량부가 남게 된다. 따라서 이를 초과하는 경우에는 면밀한 검토 수행을 통해 SCP와 PBD를 병행하여 시공하고 있다.

연약지반 상세현황과 공구별 연약지반 처리공법은 그림 5와 표 4에 나타내었다.

표 4. 연약지반 상세현황 및 처리공법

구분 공구	연약지반연장 (KM)	최대성토고 (M)	최대심도 (M)	최대예상침하량 (CM)	최대연동침하량 (CM)	연약지반 처리공법	흙분류 (USCS)
1공구	1.88	13.3	18	145	27.2	PBD	
2공구	12.19	8.8	25	267	24	PBD, SCP	CL, ML
3공구	4.49	8.7	37	515	22.7	PBD, SCP	CL, ML
4공구	6.65	13.8	53	537	55	PBD, SCP	CL, ML
5공구	3.88	7.3	37	203	34.5	PBD	CL, ML
6공구	0.82	12.5	32	375	2.6	PBD, GCP	CL, ML
7공구	0.4	20.5	7	10	-	GCP	CL, ML
8공구	6.62	14.3	43	80	26.7	PBD	CL, ML

표 5. 연직배수공법

공 법	개 요
PBD (Plastic Board Drain)	• 연약층에 투수성이 양호한 합성수지재를 타입하여 간극수를 배출시켜 압밀을 촉진시키는 공법
SCP (Sand Compaction Pile)	• 직경 700mm 정도인 다짐 모래말뚝을 지층에 형성하여 압밀촉진과 더불어 수평 방향으로 발생하는 지반 활동에 저항
GCP (Gravel Compaction Pile)	• 강성이 큰 쇄석(25mm이하) 을 압입하여 직경이 큰 쇄석다짐말뚝(700mm)을 형성하고 이를 통하여 압밀촉진 및 지반개량



그림 6. 쇄석매트+PBD 시공

표 6. 수평배수공법

공 법	개 요
쇄석매트	• 원지반과 성토체 접촉부에 모래 대신 쇄석층을 포설하여 원지반으로부터 유출되는 간극수를 성토체 외부로 배출하는 공법 (t=30cm)
천연수평섬유 배수재	• 연직배수재가 타입된 지반에 황마와 천연섬유질로 제작된 천연수평섬유배수재를 포설하여 원지반으로부터 유출되는 간극수를 성토체 외부로 배출하는 공법 • 플라스틱배수재가 지닌 환경적 제약성 해소 (친환경) • 상부모래층이 두꺼워 장비 주행성에 문제가 없는 구간에 적용



그림 7. 천연수평섬유배수재+PBD 시공



그림 8. PP mat 시공

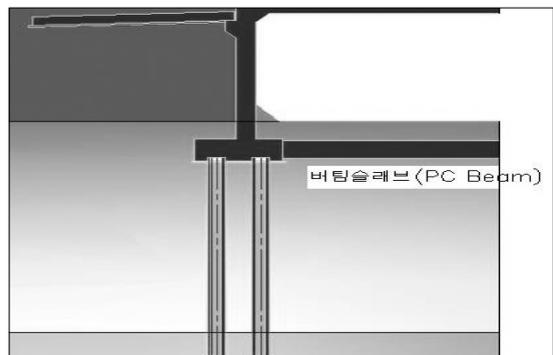


그림 9. 버팀슬래브 시공

당 현장에서 적용된 연약지반 처리공법의 세부특성과 시공전경은 표 5와 6, 그림 6~8에 나타내었다. 연약지반 처리와 더불어 구조물의 경우 축방유동이 큰 문제로 작용

한다. 이에 그림 9~11과 같은 교대 축방 유동 방지공법이 적용되었다.

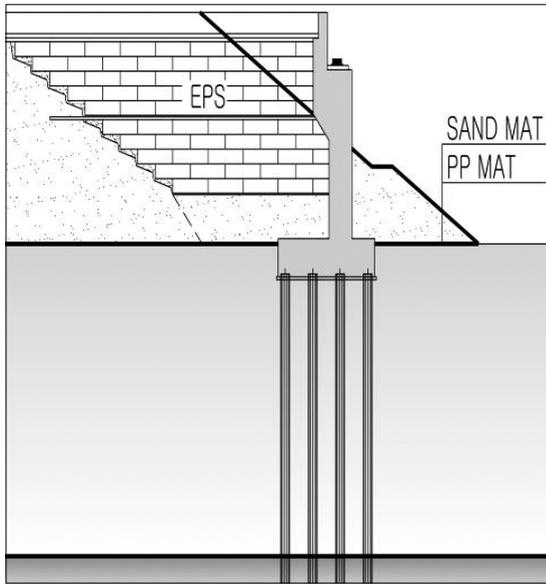


그림 10. EPS공법

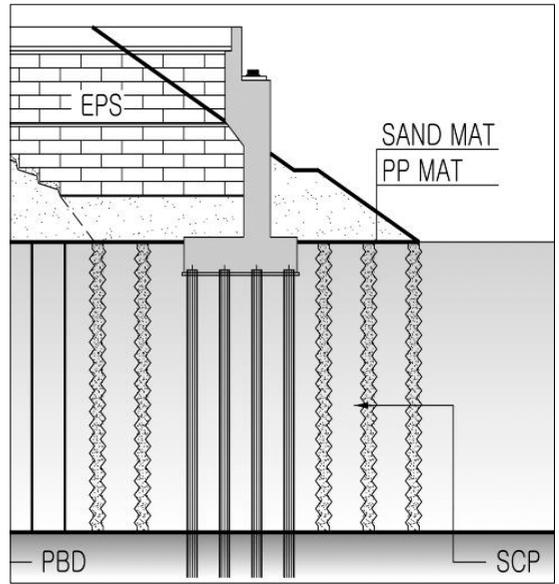


그림 11. EPS+PBD+SCP공법

## 4. 연약지반 시공관리

### 1) 성토 및 연동침하 관리

연약지반의 경우 앞서 설명했듯이 면밀한 공사관리가 요구되기에 당 현장에서는 표 7과 같은 기준으로 성토 속도를 관리하고 있다.

또한 연동침하에 대비하기 위하여 총 687개의 침하핀을 기존도로 길어깨부에 100m 간격으로 설치하고 이를 매일 관측하여 연동침하 양상을 파악 후 문제 발생 즉시 표 8의 방법으로 보수를 시행하고 있다.

### 2) 설계 개선 및 기술 검토

#### 가. 기존도로 연약지반 처리 방법 변경

확장공사부 연약지반 처리와 관련하여, 원 설계에서는 종단개량에 따른 연약지반의 안정을 위하여 기존도로 하부에 압밀촉진 공법을 적용하였다(그림12). 하지만 이 방법은 다음과 같은 문제점을 가지고 있다.

- ① 시공중 전단파괴 등 성토체 변형 우려
- ② 교통전환 후 기존도로 제거 및 PBD시공으로 인한 성토체 활동파괴 우려
- ③ 기존도로 원지반 하부가 암버럭 등으로 되어 있어 연직배수재 시공 애로
- ④ 공용후 재하력 차이에 의한 부등침하 우려
- ⑤ 기존도로 제체 제거 후 재성토에 따른 시공성 저하
- ⑥ 다단계 시공 및 낙동강 철새도래기간 공사중지 등에 의한 공기부족

이에 냉정부산건설사업단은 1996년 준공한 남해선 냉정-구포간 확장(2차로→4차로)공사 자료를 수집하였고, 다음과 같은 사실을 발견할 수 있었다.

- ① 연약지반 처리공법 선정을 위한 시험시공 결과 기존 도로 제거 후 Sand Drain 처리한 구간과 기존 도로를 무처리한 구간의 침하량의 차이는 7%로 미소하였다.
- ② 상기구간 연약지반의 잔류침하로 인한 공용 후 12년 간의 유지보수면적은 거의 유사하게 나타났다.

표 7. 성토속도 관리 기준

구분	성토관리기준	비고
평상시	1.5~3m/월	-
관리시	1m/월	계측을 통하여 위험 예상시

표 8. 연동침하 발생시 처리대책

구분	보수방법	비고
균열발생시	블로우아스팔트 주입	
단차2cm 이상 발생시	덧씌우기 시행	

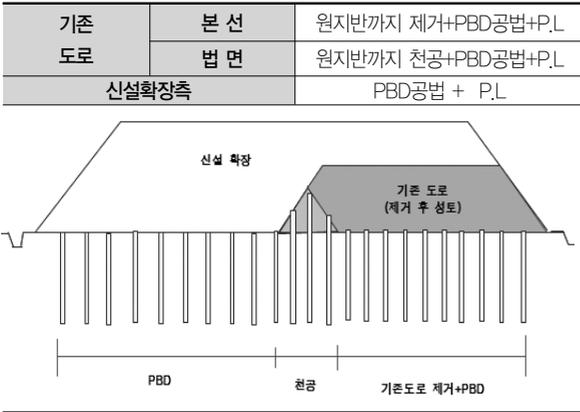
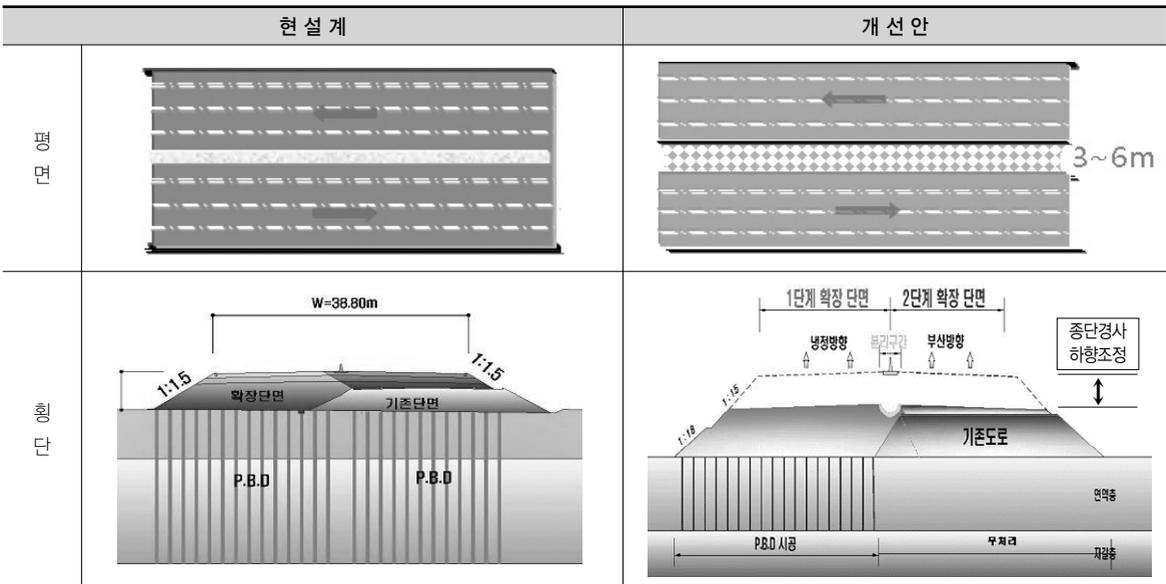


그림 12. 확장구간 연약지반 처리 당초 설계



- 기존도로 : 제거 후 재성토
- 기존도로 하부 연약지반 처리
- 기존도로 종단조정 : 성토(최대+5m)
- 평면선형 : 양방향 일체

- 기존도로 : 존치
- 기존도로 하부 연약지반 무처리
- 기존도로 종단조정 : 덧씌우기
- 평면선형 : 양방향 분리

그림 13. 확장구간 연약지반 처리 개선안

③ 잔류침하량을 분석한 결과 기존도로 연약지반 무처리 시 잔류침하량의 예측량은 평균 3cm/년으로써 이는 도로교통연구원의『연약지반 구간 고속도로 유지관리 대책수립(Ⅱ)』연약지반 평균 침하속도(2~4cm/년)와 유사하였다.  
이와 같은 사실을 바탕으로 다음과 같은 개선안을 도출하였다(그림 13).

- ① 기존도로 연약지반 처리 공법 변경  
- 기존도로제거+PBD+Pre-Loading ⇒ 무처리+Pre-Loading
- ② 종단경사 하향 조정

개선안으로 시공함에 따라 다음과 같은 시공성 및 안정성 향상, 공사비 절감, 공기단축의 효과를 가져올 수 있었다.

- ① 기존도로 연약지반 처리 및 압밀침하 소요기간 단축 (최소 10개월)
- ② 기존도로제체 제거도 및 포장깨기 시 발생하는 페아스큰 처리가 불필요하여 시공성 개선
- ③ 기존도로 법면부 천공PBD 시공에 따른 장비조합 애로 및 작업효율 저하로 인한 공사 추진 애로 해소
- ④ 기존도로 하부 PBD 시공 시 지반교란으로 인한 인접도로 및 철도, 농경지, 시설물 등의 연동침하문제 해소
- ⑤ 기존도로 존치 및 종단 하향 조정에 따른 재하성토 안정성 향상으로 전단파괴 우려 감소 및 공용중인 노선의 전반적인 안정성 향상
- ⑥ 현설계된 기존 도로의 제거, 재성토, 하부 연약지반 처리비용 절감 등으로 30억원 가량의 공사비 절감
- ⑦ 양방향 분리 녹지대 구간은 향후 잔류침하 차이로 발생하는 종발향 균열 및 단차 발생 시 수렴대 역할이 가능하여 유지관리 용이

**나. 압거 시공 시 연약지반 기초 시공 검토**

확장부 압거 구조물 시공 시 기존 통로 압거의 조기 소통을 위하여 신설구간은 연약지반 미처리 및 Pile 기초로

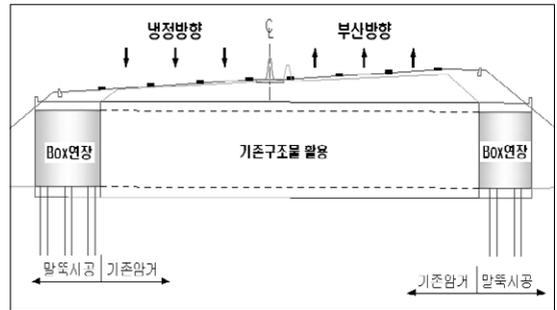


그림 14. 확장구간 압거 기초(당초)

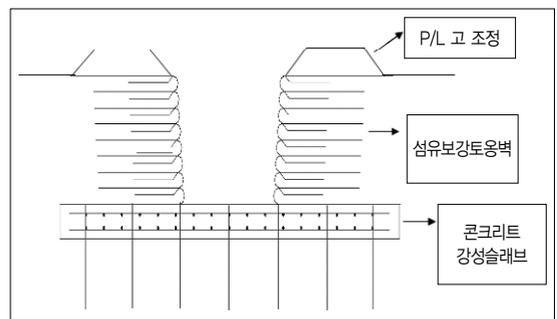


그림 15. 확장구간 압거 기초(변경)

표 9. 통로 박스 기초 시공법 변경

구분	기초 시공공법	비고
당초	Pile 기초	연약지반 미처리
변경	PBD + P/L + 압거하부 강성Slab	연약지반 처리

설계되어 있으나 확장 연장이 2.6~10.9m인 단구간에 Pile기초가 시공될 경우 부등침하에 따른 주행성 저하 및 공사비 과다소요가 예상되었다. 이에 사업단에서는 통로 박스 기초 시공방법을 표9와 같이 변경 검토하였다.

표9에서 보듯이 당초 연약지반 미처리던 구간을 잔류침하량이 허용 침하량 이하가 되도록 연약지반 처리 후 직접기초로 변경하는 방안을 검토하였고 이를 사업단에서 주관하는 “연약지반 안전시공 포럼”에서 외부 전문가들의 자문을 통해 보완하였다.

다만 하중의 영향을 고려하여 콘크리트 슬래브 강성의 정도를 결정하기 위한 논의는 계속 되고 있다. 검토 후 적용이 가능하다면 시공성이 대폭 향상되고 공사비 절감

(3.4억원, 8개소)효과를 얻을 수 있다. 압거 기초 시공 변경은 그림14와 그림15에 나타내었다.

## 5. 연약지반 계측관리

### 1) 계측관리의 목적

연약지반의 개량 설계는 복잡한 토층 및 토질특성을 단순화시켜 시행되므로 설계 시 Terzaghi의 일차원 압밀 이론식에서 사용된 가정 사항들이 실제 현장 상황과 일치하지는 않는다. 따라서 실내시험이나 현장시험의 자료를 이용하여 설계의 추정치에 내포된 불확실성과 설계 단계에서의 자료부족으로 인한 연약지반의 성토 시공관리의 문제점을 시공 중 계측관리를 통해 보완해야 한다.

또한 계측 결과를 바탕으로 과다한 지반변형으로 인한 파괴가 시공 중 발생하지 않도록 안전시공을 유도하는 것도 계측관리의 목적이라 하겠다. 냉정-부산 고속도로 건설현장에서 적용된 계측기 설치 단면도 및 수량은 그림16과 표10에 나타내었다.

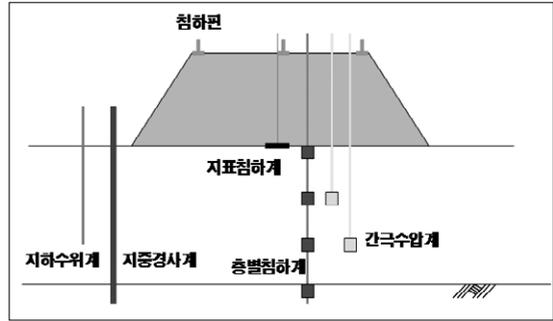


그림 16. 냉정-부산 고속도로 연약지반 계측기 설치 단면도

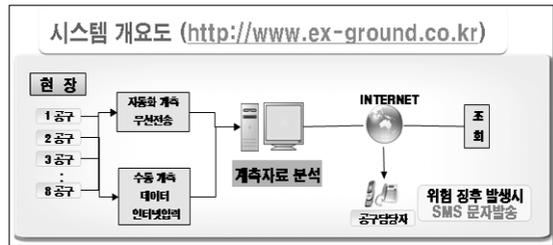


그림 17. 통합계측시스템 개요도

### 2) 통합계측시스템 구축

사업구간의 대부분이 연약지반인 사업단 특성에 따라 최신의 IT 기술을 접목하여 전공구 통일되고 체계적인 관리시스템을 구축하였다.

통합계측시스템은 그림17에 대략적인 개요도를 나타냈고, 다음과 같은 시스템으로 구축되어 있다.

첫째는 자동화 계측 시스템으로 공구별 연약지반 중 전 단파괴 발생 위험우려가 높은 곳을 사전 선정하여 실시간 자동화 계측시스템을 도입함으로써 인터넷을 통한 실시간 관리가 가능토록 했다.

둘째는 웹 기반 프로그램을 활용한 수동계측 시스템이다. 매일 공구에서 계측하는 데이터를 인터넷 상에 설치된 프로그램에 직접 입력하면 그와 동시에 계측결과 분석이 가능한 수동계측 시스템을 구축하였다.

셋째는 계측 결과의 분석 및 이를 바탕으로 한 성토시공 관리 기준의 설정이다. 표11과 같은 대표적인 침하 및

표 10. 계측기 설치 수량

항 목	수 량
지표침하판	461
지중경사계	302
간극수압계	169
지하수위계	345
총별침하계	167
침하판	687
액체침하계	4

안정관리 기법으로 계측결과를 분석 후 성토속도 조절 등으로 성토 시공의 안전 관리를 이룩하였다.

특히 안정관리의 경우, 확장공사의 특성상 기존도로의 연동침하는 이용고객의 직접적인

안전과 연계됨에 따라 보다 철저한 관리가 요구된다. 이에 표12와 같이 단계별 한계치를 설정하고 각 한계치에 도달 시 자동으로 공구 및 사업단 담당자에게 SMS를 송신하여 보다 면밀한 공사관리가 가능토록 했다. 통합계측 관리 시스템의 실제 이용 화면은 그림 18, 그림 19, 그림 20, 그림 21을 통해 나타내었다.

표 11. 냉정-부산 고속도로에 적용된 계측자료 관리 기법

침하관리 기법	안정관리 기법	비 고
쌍곡선법	Tominaga -Hashimoto법	
Hoshino법	Kurihara법	
Asaoka법	Matsuo -Kawamura법	

표 12. 안정관리 단계별 한계치

안정관리 기법	단계별 한계치	
	1차 관리치	2차 관리치
Tominaga -Hashimoto법	0.3	0.5
Kurihara법	0.6	1
Matsuo -Kawamura법	0.8	0.9



그림 18. 통합계측시스템 시작화면(전체노선)



그림 19. 계측지점 확인

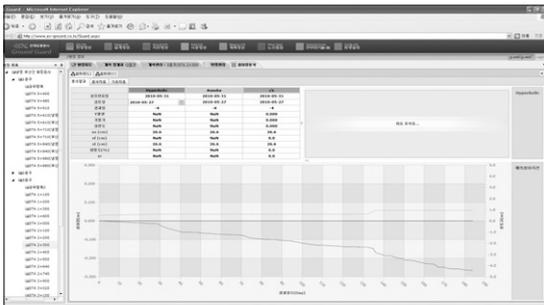


그림 20. 계측 지점별 침하관리

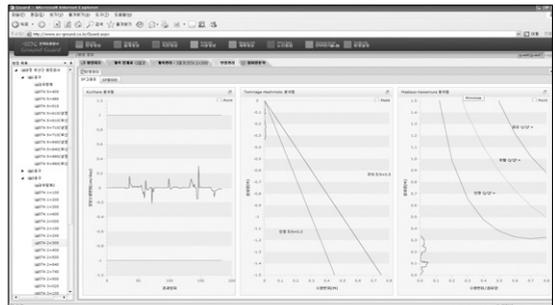


그림 21. 계측 지점별 안정관리

## 6. 맺음말

대심도 연약지반은 다수의 불확실한 변수를 가지고 있어 고속도로 건설 시 시공과 유지관리에 큰 문제가 발생할 수 있다. 이에 냉정부산건설사업단에서는 통합계측시스템을 통해 철저한 계측 관리와 더불어, 풍부한 경험을 가진 산·학·관 전문가를 위원으로 하는 연약지반 안전 시공 포럼을 개최하여 전문가들의 의견을 현장에 적극 반영하고 있다. 또한 43개의 자체 취약공종을 선정하여 유지관리부서와 공동으로 집중 관리하여, 공용 시 발생이 우려되는 문제점을 공사단계에서 사전 해결하는 등 이용

고객의 안전은 물론 부산경남지역 교통혼잡 완화를 위해 최선의 노력을 기울이고 있다.

## 참고 문헌

- 박성재(2004), 부산·경남지역 연약지반 토질 특성, 창립20주년 한국지반공학 발자취 2004, Vol.0, No.0, P.165~175
- 권기호,배종건,고광진,정성교 (1996), 낙동강 하류지역의 충적점토에 대한 토질역학적 특성, 대한토목학회 학술발표회 논문집, Vol.1996, No.3, P.395~398