



부천대학교 토목과

기 초 공 학

조 성 하 (토질 및 기초 기술사)
(shacho88@gmail.com / 010-5351-1751)

제8장 연약지반

연약지반 설계 사례

준설토 투기를 통해 항만 부지조성 공사를 위한 연약지반 설계

- | | |
|------------------|---------------|
| 1) 설계 기준 | 2) 설계정수 산정 |
| 3) 가토제 형식과 단면 검토 | 4) 표층처리공 설계 |
| 5) 연직 배수공 설계 | 6) 압밀수 배수공 설계 |
| 7) 시공 단계별 안정성 검토 | 8) 지반 변형 해석 |



1) 설계 기준

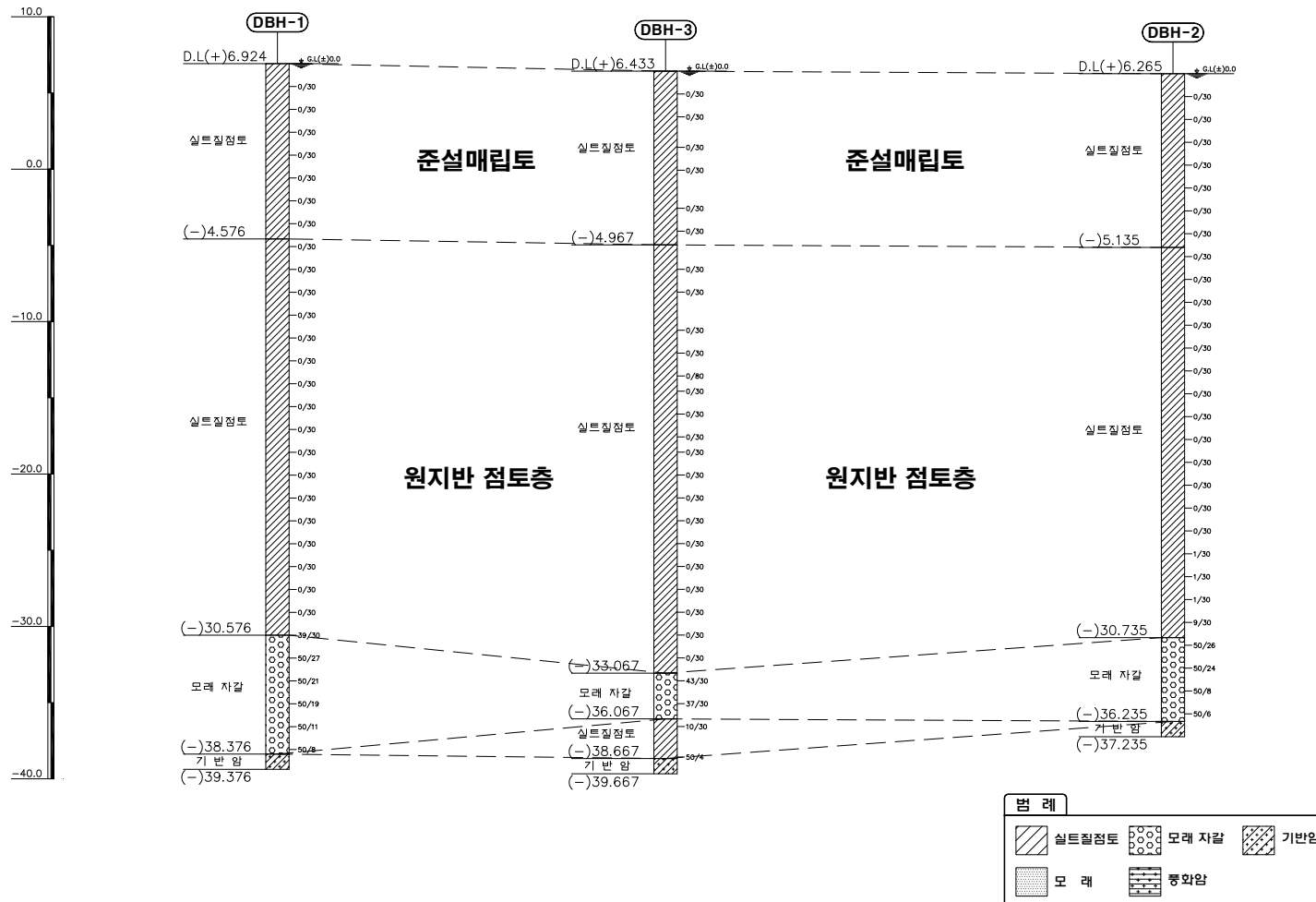
구 분	발행처	년도	비고
항만시설물 설계기준서	해운항만청	1993	해양수산부
콘크리트 표준시방서	건설교통부	1996	
항만공사 표준시방서	해양수산부	1996	
도로교 표준 시방서	건설교통부	1996	
하 천 시 설 기 준	건설교통부	1993	
한 국 산 업 규 격	한국표준협회		
내 진 설 계 기 준	건설교통부	1997	
정부 방침 및 외국기준			

- 지역별 배후부지나 배후단지의 설계하중은 약 1.5tf/m²을 적용
- 설계조위는 해양수산부 국립해양조사원에서 고시된 가덕도 천성만내 해상 TBM NO.1(DL.(+) 3.819m)의 관측자료를 이용한 가덕도 지역의 조위를 기준
- 재료특성
- 부지이용계획 및 계획고 : 평균 부지 계획고를 DL.(+)4.0m를 설계
- 허용 잔류침하량은 2차 압밀침하량 및 미타설층의 압밀침하량을 제외한 1차 입밀침하량의 30cm를 기준
- 사면 활동 안전율

구 분	비 중	단 위 중 량		내부마찰각 (°)	점착력 (tf/m ²)	비 고
		γt(tf/m ³)	γsat(tf/m ³)			
복토층	-	1.70	1.80	35	-	표층제거토
사석층	-	1.80	2.00	35	-	항만 및 어항 설계기준

구 분	시 공 시	상 시	지 진 시	비 고
원호활동 (FS)	1.2	1.3	1.1	

2) 설계 정수 산정



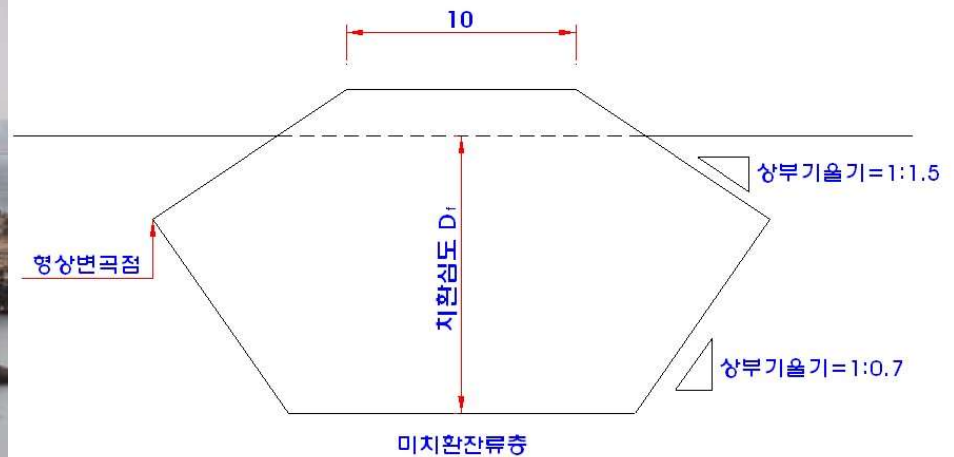
2) 설계 정수 산정

구 분		부산신항 북컨테이너 배후부지(FA-II)		웅동투기장내 가적치장 예정부지 조사결과		설계 적용값	
		준설매립 점토층	원지반 점토층	준설매립 점토층	원지반 점토층	준설매립 점토층	원지반 점토층
단위중량 r_t (tf/m ³)		1.58	1.69 -0.00005Z	1.44	1.58	1.44	1.58
전단강도 S_u (tf/m ²)		0.05~0.30	0.16Z+0.5 (N≤6) N/1.6(N>6)	0.1 +0.00833Z	0.6+0.133Z	0.1 +0.00833Z	내부:0.6+0.133Z 외부:0.3+0.132Z
강도증가율 (m)		0.18	0.24	0.28	0.28	0.28	0.28
압축곡선 (e-logP)	e_o	1.96	1.69+0.0001Z	$e=1.926$ -1.13logP	$e=1.759$ -0.864logP	$e=1.926$ -1.13logP	$e=1.759$ -0.864logP
	c_c	1.05	0.56~0.93				
과압밀비 (OCR)		0.6	1.0	0.5	1.0	0.5	1.0
수평압밀계수 c_h (cm ² /sec)		2.75~3.59×10 ⁻⁴			3.01×10 ⁻⁴ (연직압밀계수)	3.59×10⁻⁴ (계측분석자료)	3.59×10⁻⁴ (계측분석자료)
투수계수 k_v (cm/sec)		-	2.3×7.93× $e^{-0.00425Z}$	-	3.31×10 ⁻⁸	3.31×10⁻⁸	3.31×10⁻⁸

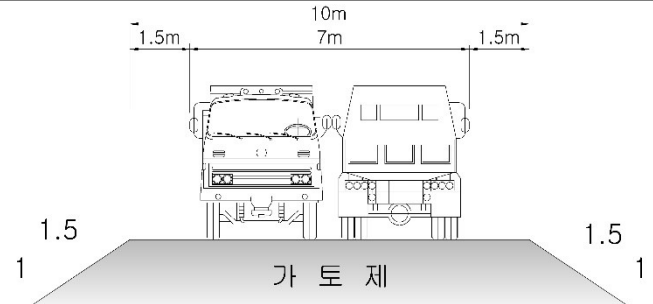
3) 가토제 형식과 단면 검토

- 정형화된 설계법이 정립되어 있지 않으며 일반적으로 지지력식에 의한 치환심도만을 산정하여 설계에 적용
- 치환심도는 극한지지력 공식을 이용한 Terzaghi의 지지력 공식 방법과 Matar & Salenson식을 이용하여 작용하중과 지지력이 평형을 이루는 깊이를 치환심도로 산정.

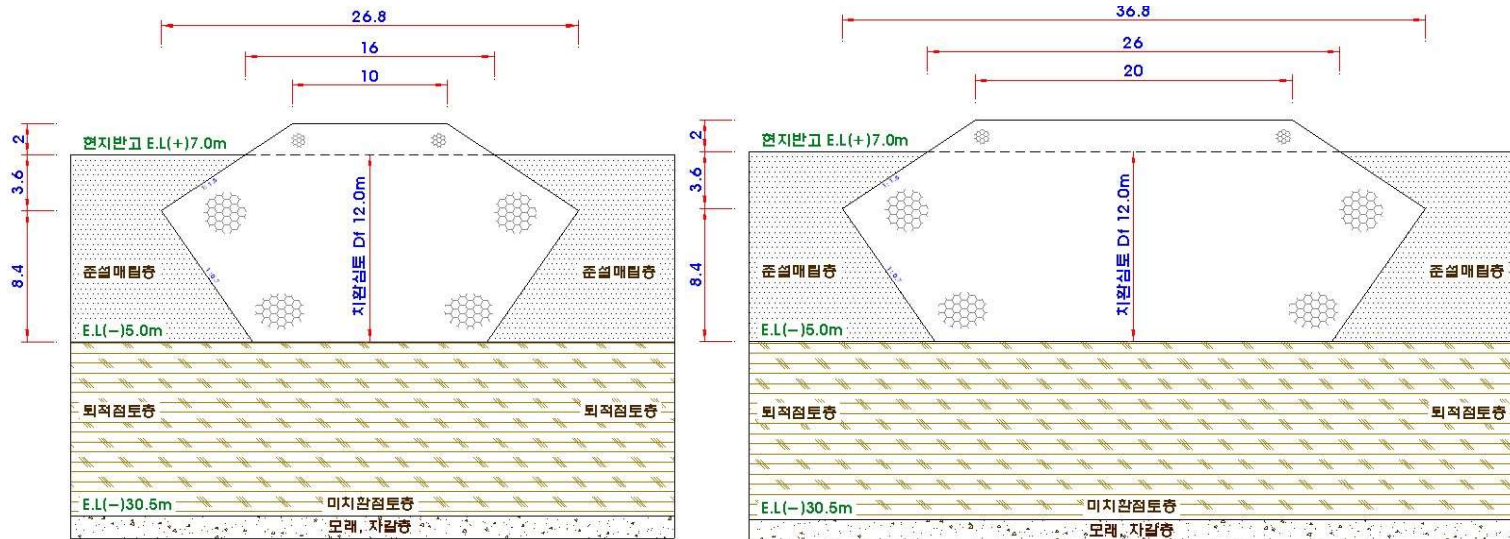
Terzaghi의 지지력 공식	Matar & Salenson 식
<ul style="list-style-type: none"> • 극한지지력평형식에 의해 산정되어 치환심도가 과대평가 • 미치환 잔류층에 의한 원지반의 지지력 증가를 고려하지 못함 	<ul style="list-style-type: none"> • 미치환층에 의한 N_c 증가 고려 • 미치환층의 두께에 따른 치환심도의 변화를 반영



3) 가토제 형식과 단면 검토

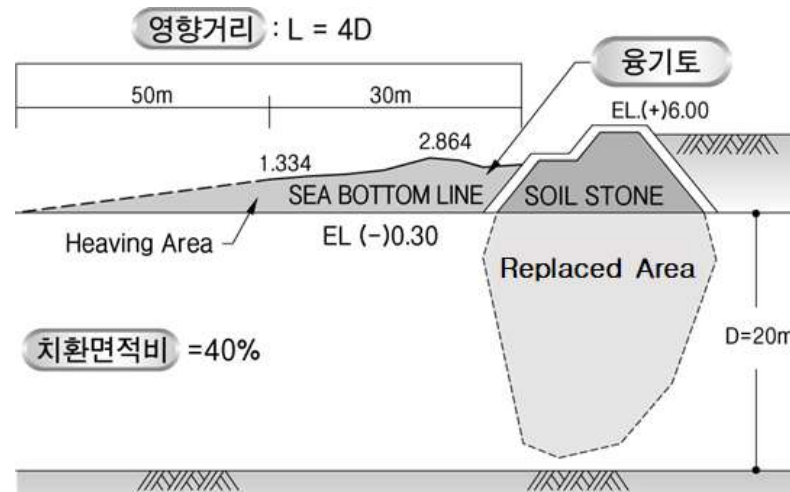
덤프트럭 교행이 가능한 마루폭 산정	적용 마루폭
	<ul style="list-style-type: none"> • 덤프트럭 차폭 : 2.5m • 편도 차선폭 : 3.5m • 여유폭 : 3.0m(1.5m×2) • 적용 마루폭 = 차선폭 × 양방 통행 + 여유폭 • : 7.0 + 3.0 = 10.0m

- 덤프트럭 통행을 위한 강제치환 가토제 단면
- PBD 시공을 위한 강제치환 가토제 단면



3) 가토제 형식과 단면 검토

- 가토제 축조에 따른 준설토 용기고 검토



구분		1호안 구간	2호안 구간	호안 총연장	준설토표면 상승고(m)
호안연장(m)		555	880	1,435	
전체단면적(m ²)		419	419	419	
상단면적(m ²)		46	46	46	
하단면적(m ²)		373	373	373	
할증		1.2	1.2	1.2	
하단체적(할증포함, (m ³))		447.6	447.6	447.6	0.52
용기 토량 (m ³)	전체	1,234,497m ³		642,306	
	A	210,075m ³	124,209	124,209	
	B	284,585m ³	196,944	321,153	
	C	739,837m ³	196,944	196,944	

4) 표층처리공 설계

- 준설 매립된 점토층의 경우 장기간 방치하더라도 표면의 일부만 건조되어 본 현장에서 요구하는 양의 성토를 위한 장비의 주행성이 확보되지 못함
- 시간적인 여유가 많은 경우에는 장비의 주행성을 확보할 수 있는 두께까지 표층부를 건조되도록 방치하면 되나, 과업 목적상 시간이 촉박한 경우에는 방치기간을 늘릴 수는 없으므로 단시간내 시공장비의 주행성을 확보하기 위해 표층처리공법 적용



4) 표층처리공 설계

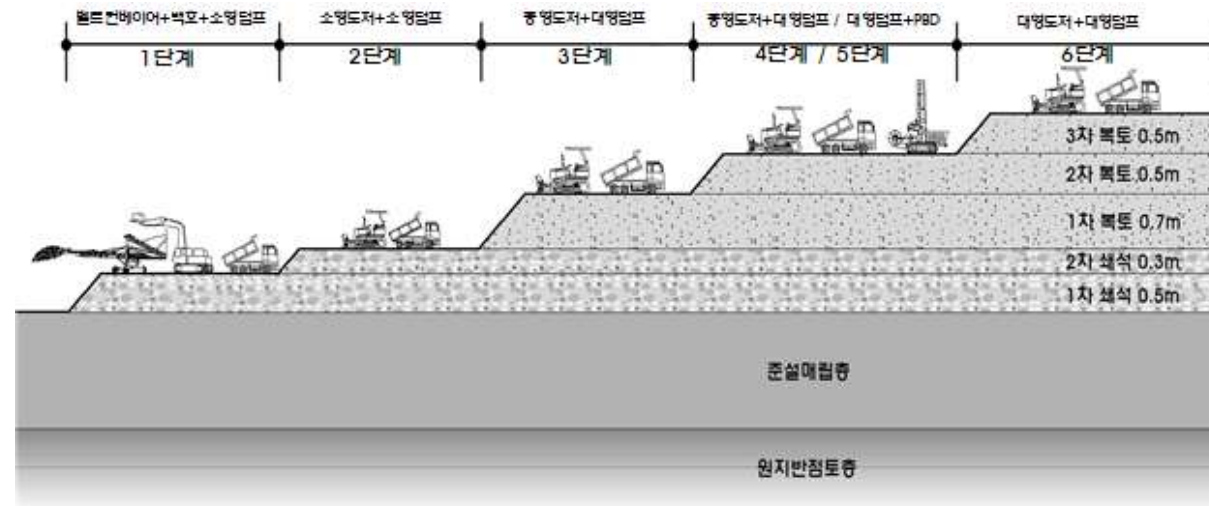
구분	개량원리	공법명	개량방법	적용
복토공법	하중분산	습지불도저+덤프트럭에 의한 포설	<ul style="list-style-type: none"> 장비를 이용하여 모래를 점성토층 상부에 얇게 포설하여 하중을 분산시켜 지지력 확보 포설된 모래층은 원지반 간극수의 배수를 위한 Sand 매트 기능 수행 일반적으로 타 표층처리공법과 조합되어 사용됨 	벨트컨베이어 방식 적용
		벨트 컨베이어에 의한 포설		
		고압건식모래포설		
		고압습식모래포설		
		크레인을 이용한 포설		
토목섬유 부설	지반보강	인력부설	<ul style="list-style-type: none"> 고강도의 토목섬유를 점성토층 상부에 부설하여 토목섬유의 인장력으로 지지력 확보 부설방법에 따라 공법이 구분됨 	Skid에 의한 매트부설 방식 적용
		Skid에 의한 매트부설		
보강재 삽입	지반보강	대나무 매트	<ul style="list-style-type: none"> 강성이 큰 보강재를 점성토층 상부에 부설하여 보강재의 강성으로 지지력 확보 	대나무매트 적용
		부목, 침상		
표층고화	물리적 고결	자연건조	<ul style="list-style-type: none"> 자연건조 혹은 진공압에 의해 점성토층 표층부의 전단강도를 증가시켜 지지력 확보 	
		PTM		
		Suction Device		
		이중매트에 의한 표층압밀		
	화학적 고결	천층고화처리	<ul style="list-style-type: none"> 고화재를 이용 표층의 일부를 고결시키거나 강성이 큰 경량의 성토재를 포설해 지지력 확보 	
		경량혼합토		
치환		선행치환공법	<ul style="list-style-type: none"> 소규모 표층지반 개량시 양지토를 치환함으로써 개량 	

4) 표층처리공 설계

구분	토목섬유	대나무매트	벨트컨베이어에 의한 복토	친환경 경량혼합토 펌프포설
개요도				
특징	<ul style="list-style-type: none"> 토목섬유 매트 공법을 적용함으로써 안정성 확보에 주력함. 시공경험 풍부, 장비조합 유리 토목섬유의 분리 기능으로 원지반과 복토사이의 재료 혼합 방지 초연약지반의 경우 인력포설이 곤란하므로 본 현장에서는 Skid을 이용한 포설 방식 적용 시공이 간단하고 공사비가 상대적으로 저렴 	<ul style="list-style-type: none"> 대나무매트의 휨강성에 의한 하중지지 공법으로 부력기초의 역할을 함. 대나무 강성에 의한 복토층 최소화 재료를 쉽게 구할 수 있으며, 급속 시공이 가능함 배면에 토사를 성토할 경우 용기우려 및 품질관리가 어려우므로 본 현장에서는 1차복토층을 쇄석으로 적용함. 	<ul style="list-style-type: none"> 뿌리기식 포설이므로 균등포설이 가능함 포설거리가 최대 30m이므로 포설장비가 복토층에서 작업되므로 준설토의 함몰이나 용기현상이 현격히 줄어듦 준설토의 표층에 작용하는 하중을 균등분포시켜 준설토층의 교란을 최소화하여 준설토 강도 저하를 줄임 벨트로 포설시 취약구간을 육안으로 확인하여 대처가 다소 용이함 	<ul style="list-style-type: none"> 펌프에 의한 뿌리기식 포설이므로 균등포설이 가능함(인력에 의한 정지작업 필요) 포설거리가 최대 60m이상으로 장거리 이송이 가능하므로 준설토 표층의 교란이 최소화 준설토와 석탄회를 사용하므로 친환경공법
문제점	<ul style="list-style-type: none"> 히빙발생 자체 공법만으로는 초연약지반상의 보강효과를 기대하기 어려우므로 다른 공법과 병행하여 시공 	<ul style="list-style-type: none"> 대나무 길이 제한으로 구조적으로 취약한 이음부 발생 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 불도저에 의한 밀어내기식 복토보다는 시공비가 고가 	<ul style="list-style-type: none"> 시공사례가 적음 준설토의 입도와 석탄회의 함수비에 의한 혼합교반효율을 철저히 관리해야 함
적용	토목섬유+대나무매트+복토공법(벨트컨베이어 쇄석포설 + 친환경 경량 혼합토 펌프 포설)을 제안			

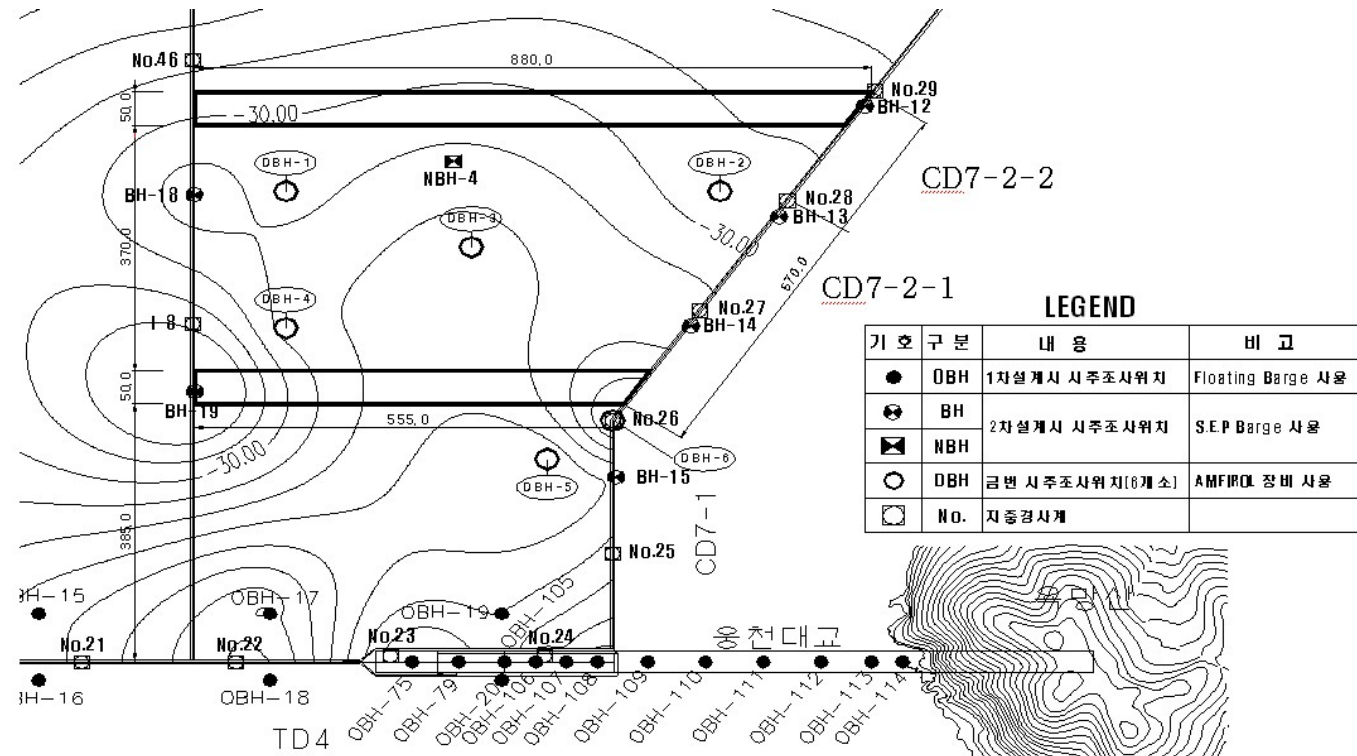
4) 표층처리공 설계

시 공 단 계	장비 제원		원지반상 작용응력		Geo- textile 허용강도(T)	허용 지지력(q_a , tf/m ²)		판 정
	사용 장비명	접지압 (P, tf/m ²)	복토두께 (H, m)	접지응력 (σ , tf/m ²)		Yamanouchi	Meyerhof	
1단계 (1차쇄석 0.5m)	벨트 컨베이어	2.36	0.5	2.49	12.50	9.11	4.15	O.K
	굴삭기(0.2m ³)	3.55	0.5	2.74	12.50	26.67	6.27	O.K
	덤프트럭(2.5t)	41.29	0.5	8.18	12.50	30.31	8.24	O.K
2단계 (2차쇄석 0.3m)	소형 도져(7t)	2.34	0.8	2.57	12.50	19.73	5.44	O.K
	덤프트럭(2.5t)	41.29	0.8	5.21	12.50	41.01	11.39	O.K
3단계 (3차쇄석 0.2m)	소형 도져(7t)	2.34	1.0	2.73	12.50	22.65	6.16	O.K
	덤프트럭(2.5t)	41.29	1.0	4.48	12.50	48.14	14.97	O.K



5) 연직 배수공 설계

구 분	표 고(DL.)		총 두께 (m)	체적 (m ³)	과업부지 면적 (m ²)	지반개량 대상층 평균길이 (m)	연직배수공 시공전 침하(m)	지반개량 처리길이 (m)
	상 단	하 단						
준설 매립토	(+)6.5m	(-)5.0m	11.5	1.330×10 ⁷	3.33×10 ⁵	39.4	0.45	38.95
원지반 점토층	(-)5.0m	(-)28.3~(-)34.0	23.3~29.0					



5) 연직 배수공 설계

구 분	Plastic Vertical(Board) Drain	Sand Drain	Pack Sand Drain
공법개요	<ul style="list-style-type: none"> 연약 점토지반 중에 투수성이 양호한 합성수지재를 타설하여 배수거리를 단축시켜 압밀침하를 촉진 	<ul style="list-style-type: none"> 연약층 내에 직경 30~50cm의 모래기둥을 설치하여 점성토층내의 배수거리를 단축시킴으로써 압밀을 촉진 	<ul style="list-style-type: none"> 투수성이 양호한 모래를 화학합성 유지로 된 망대(합성수지팩)에 넣어 타설하여 수평배수 효과에 의한 압밀침하를 촉진
장점	<ul style="list-style-type: none"> 공장제품으로 품질관리 유리 지층변화가 심한 곳에서 적용성 우수 접지압이 작아 주행성 우수 국내시공실적 및 설계시 고려되는 입력값에 대한 연구자료 많음 	<ul style="list-style-type: none"> 투수효과가 우수함 불균질한 지층에서 작업성이 양호함 국내 시공실적이 많음 모래치환에 따른 강도증가 기대 	<ul style="list-style-type: none"> 투수효과가 우수함 Sand Drain보다 모래사용량 적음 Drain재 절단가능성 적음 4분 동시 타설로 공기단축 Pack 기둥의 노출로 시공확인 가능
단점	<ul style="list-style-type: none"> 대심도의 경우 Well 저항 발생 가능성 있음 배수재의 열화현상으로 배수 유효기간이 짧음 Casing 인발시 배수재가 함께 올라올 우려가 있음 	<ul style="list-style-type: none"> 대형장비에 의한 접지압이 큼 모래말뚝의 시공정도 관리 등 시공관리가 어려움 해사수급이 곤란 	<ul style="list-style-type: none"> 연약층 심도가 급변할 경우에 미개량부가 생겨 시공품질이 저하됨 양질의 재료확보가 곤란 타설간격 조정 불가능 케이싱내 Pack 낙하시 고임현상 발생
시공속도	<ul style="list-style-type: none"> 빠름(1500~2300m/일) 	<ul style="list-style-type: none"> 늦음 (200~500m/일) 	<ul style="list-style-type: none"> 보통 (500~1000m/일)
시공한계	<ul style="list-style-type: none"> 최대 50m 	<ul style="list-style-type: none"> 최대 30m 	<ul style="list-style-type: none"> 최대 35m
품질관리	<ul style="list-style-type: none"> 용이 	<ul style="list-style-type: none"> 곤란 	<ul style="list-style-type: none"> 곤란
진동소음	<ul style="list-style-type: none"> 없음(유압식) 	<ul style="list-style-type: none"> 다소발생 	<ul style="list-style-type: none"> 다소발생
시공장비	<ul style="list-style-type: none"> 비교적 소형 	<ul style="list-style-type: none"> 대형장비 	<ul style="list-style-type: none"> 대형장비
공 사 비	<ul style="list-style-type: none"> 저렴 	<ul style="list-style-type: none"> 고가 	<ul style="list-style-type: none"> 보통
설계적용	<ul style="list-style-type: none"> 시공사례가 풍부하고 시공장비가 비교적 소형이며 품질관리가 유리한 PBD 공법 적용 		

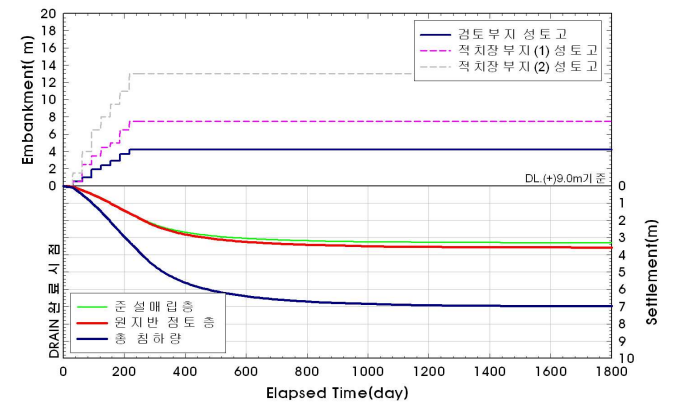
5) 연직 배수공 설계

- 연직배수재의 설치시 지반이 교란되는 영향(Smearing Effect) 및 배수재의 흐름저항(Well Resistance)을 고려하여 압밀도 계산

구 분	적 용 식	적용값				
		신설가토제	외곽호안 배면부	내부호안 배면부	적치장 부지-1	적치장 부지-2
드레인 배치간격 (d, m)	1.2 ~ 1.8	1.2×1.2	1.2×1.2	1.6×1.6	1.8×1.8	1.8×1.8
등가환산 직경 (d _w , m)		0.066 적용 : 0.05	0.066 적용 : 0.05	0.066 적용 : 0.05	0.066 적용 : 0.05	0.066 적용 : 0.05
등가영향원 직경 (d _{er} , m)	정사각형배치 1.128 × S	1.354	1.354	1.805	2.030	2.030
드레인 간격비 (n)		20.51	20.51	27.35	30.76	30.76
투수계수 감소비 (η)		0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
교란영역 직경 (d _{sr} , m)	d _w × S(4.8배)	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
드레인재 통수능력 (q _w , cm ³ /sec)		5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
Smear Zone 직경비 (S)	멘드렐 직경의 2.5배	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
드레인재 투수계수 (k _w , cm/sec)		1.00×10 ⁻¹	1.00×10 ⁻¹	1.00×10 ⁻¹	1.00×10 ⁻¹	1.00×10 ⁻¹

5) 연직 배수공 설계

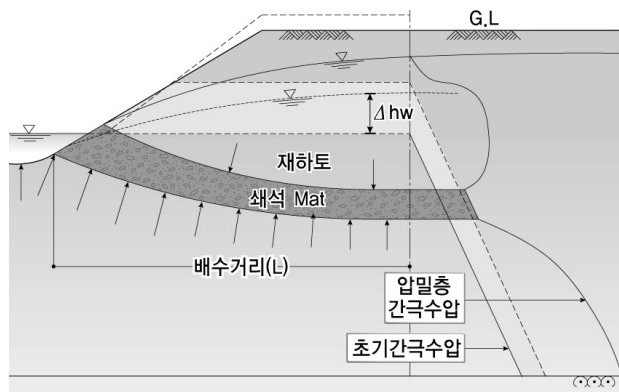
구 분	원 지반고 (DL.m)	준설토 두께 (m)	원지반 점토층 두께(m)	부지 계획고 (DL.m)	총 성토고 (m)	침 하 량(m)-성토완료후				침하후 지반고 (DL.m)
						준설 매립토	원지반 점토층	전체 침하량	잔류 침하량	
신설가토제 및 외곽호안 배면부	(+)7.0	12.0	25.5	(+)4.0	6.2	2.05	2.09	4.13	1.95	9.1
내부호안배면부	(+)7.0	12.0	25.5	(+)4.0	6.0	1.42	1.39	2.80	3.28	10.2
적치장 부지-1	(+)7.0	12.0	25.5	(+)4.0	9.5	1.48	1.46	2.94	3.14	13.6
적치장 부지-2	(+)7.0	12.0	25.5	(+)4.0	15.0	1.82	1.89	3.71	2.37	18.3



6) 압밀수 배수공 설계

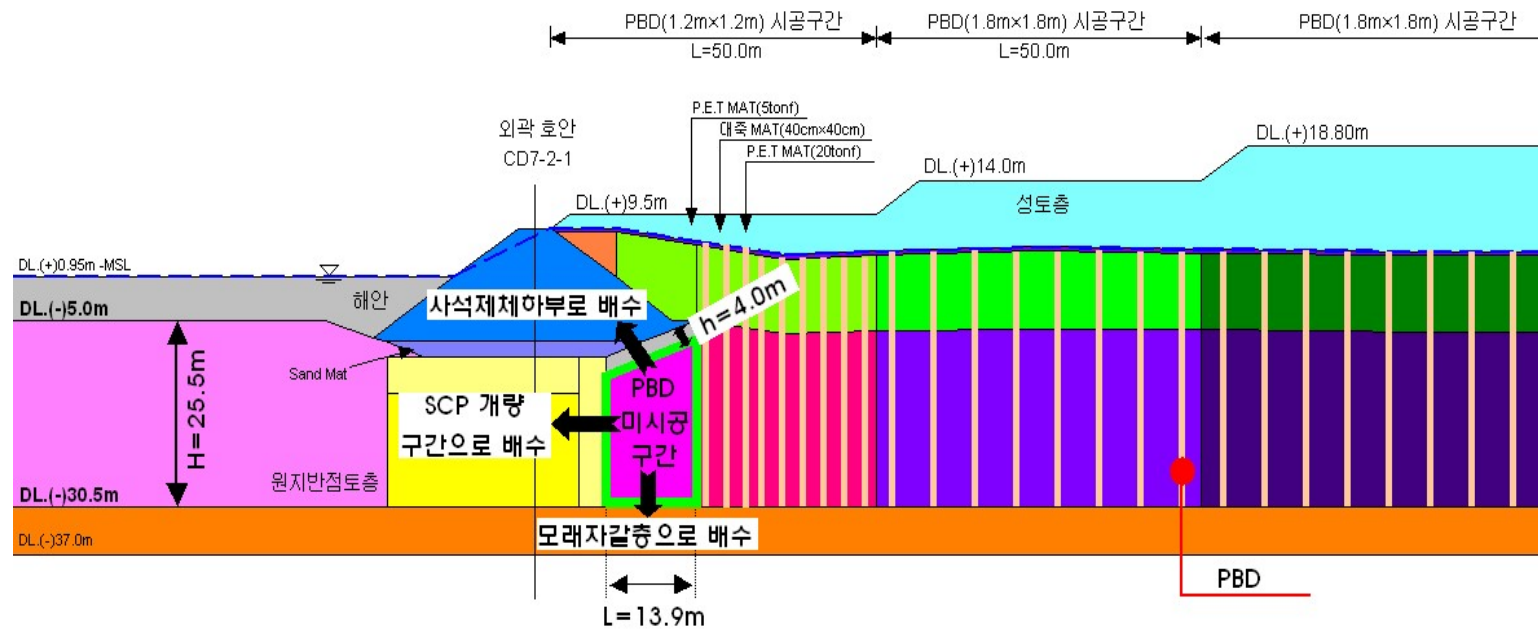
- 수평배수층의 일반적인 품질기준 : D15 : 0.075~0.9mm, D85 : 0.4~8.0mm, 0.075mm (No.200 체) 통과량 : 15% 이하
- 수평배수관(재)의 규격, 배수 경사별 통수능력
- 집수정과 양수펌프 설계

구역구분	PBD 배치간격	하루당 평균침하량 (cm/day)	쇄석매트 투수계수 k_v (cm/s)	쇄석매트 소요두께 (cm)	배수거리 L (m)	수두차 $\Delta h_w'$ (cm)
신설가토제 및 외곽호안 배면	1.2mX1.2m	3.27	0.05	390	200	388
내부호안 배면	1.6mX1.6m	2.89	0.05	370	200	362
직치장부지-1	1.8mX1.8m	3.75	0.05	420	200	413
직치장부지-2	1.8mX1.8m	4.87	0.05	480	200	470



7) 시공 단계별 안정성 검토

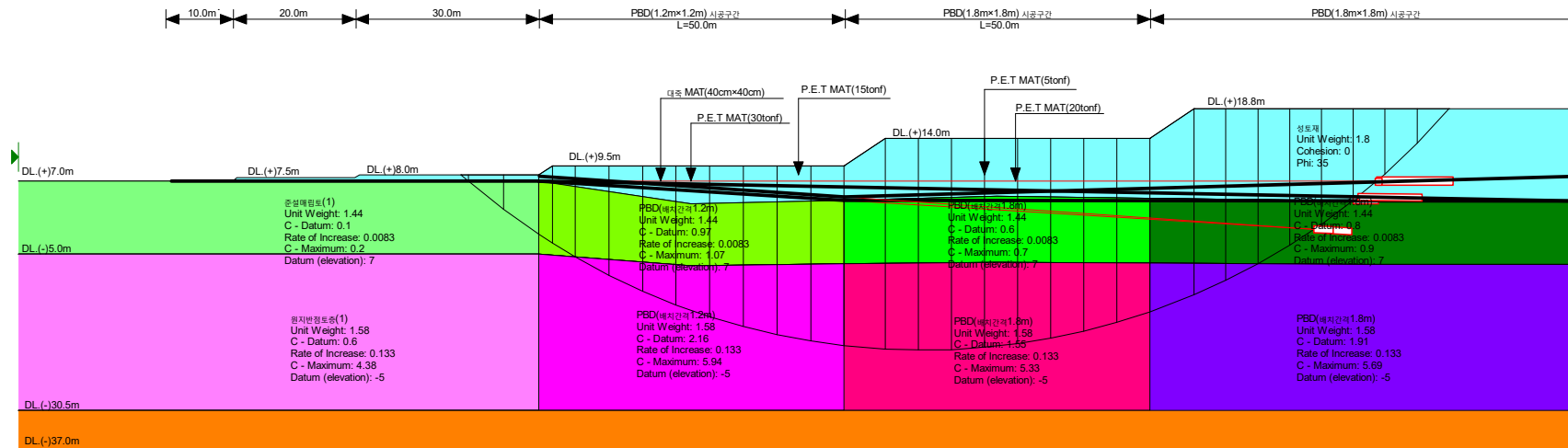
- 성토 사면의 원호활동 검토 해석방법으로 한계평형해석을 적용(Slope/w)
- 토목섬유의 인장강도는 드레인 시공으로 교란된 상태이므로 토목섬유(안전율:4.8)와 대나무 매트(안전율:4.0)의 인장강도를 적용



7) 시공 단계별 안정성 검토

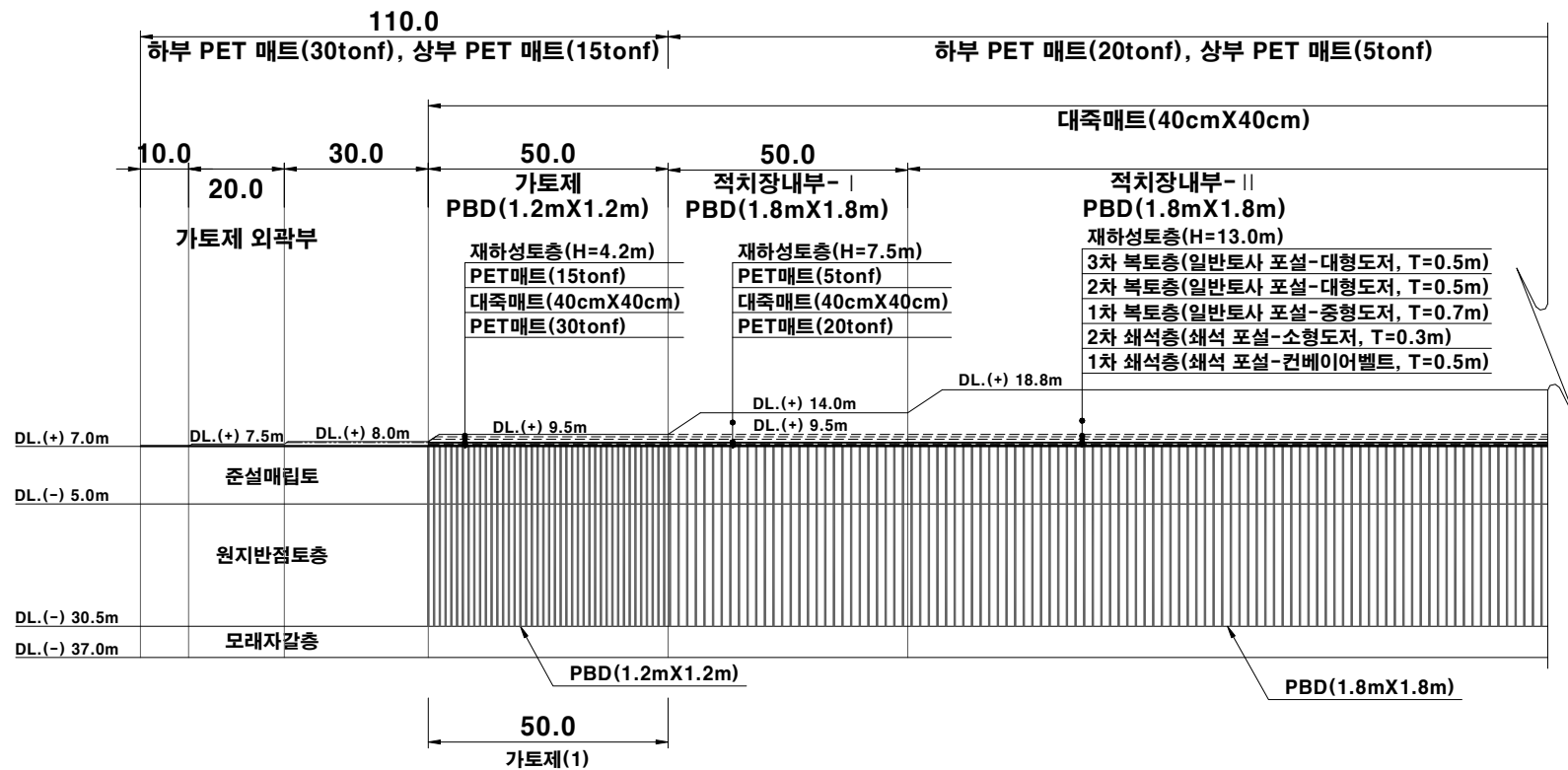
성토단계 구 분	1	2	3	4	5	6	7	8
신설가토제 외곽부	3.60 6	3.210	2.984	2.175	2.479	2.804	2.460	2.745
적치장 내부	-	-	1.580	1.384	1.355	1.592	1.404	1.413
전체	-	-	1.538	1.544	1.414	1.380	1.364	1.283

1.283



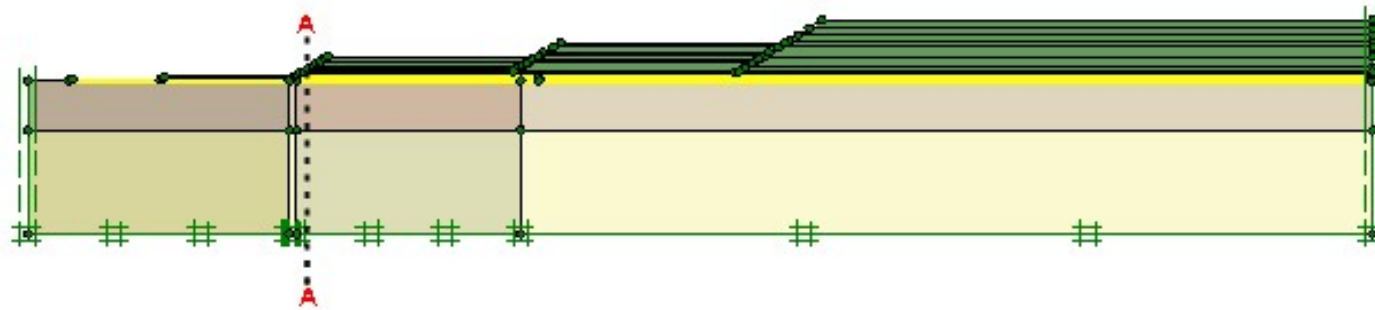
8) 지반 변형 해석

- 원지반 점성토와 준설패립층 등 연약지반을 모사하기 위해 Soft soil model을 적용하였으며, 사석 제체, SCP 개량층, 성토재 등 연약지반 이외의 지층에 대해서는 Mohr-Coulomb model을 적용
- 수치해석 프로그램 Plaxis 적용

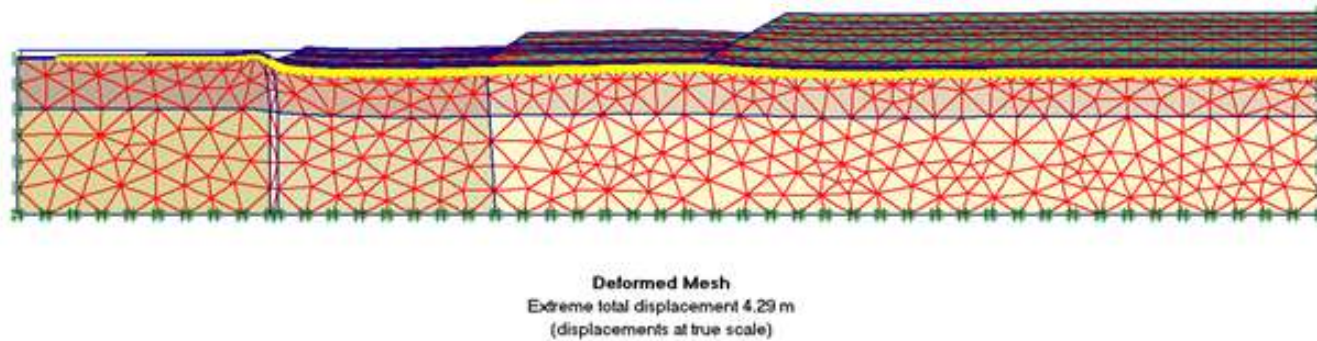


8) 지반 변형 해석

- 가토제 해석 모델링

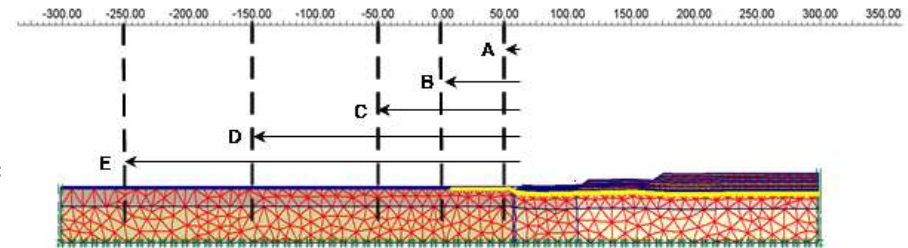


- 가토제 해석 결과 지반 변형



8) 지반 변형 해석

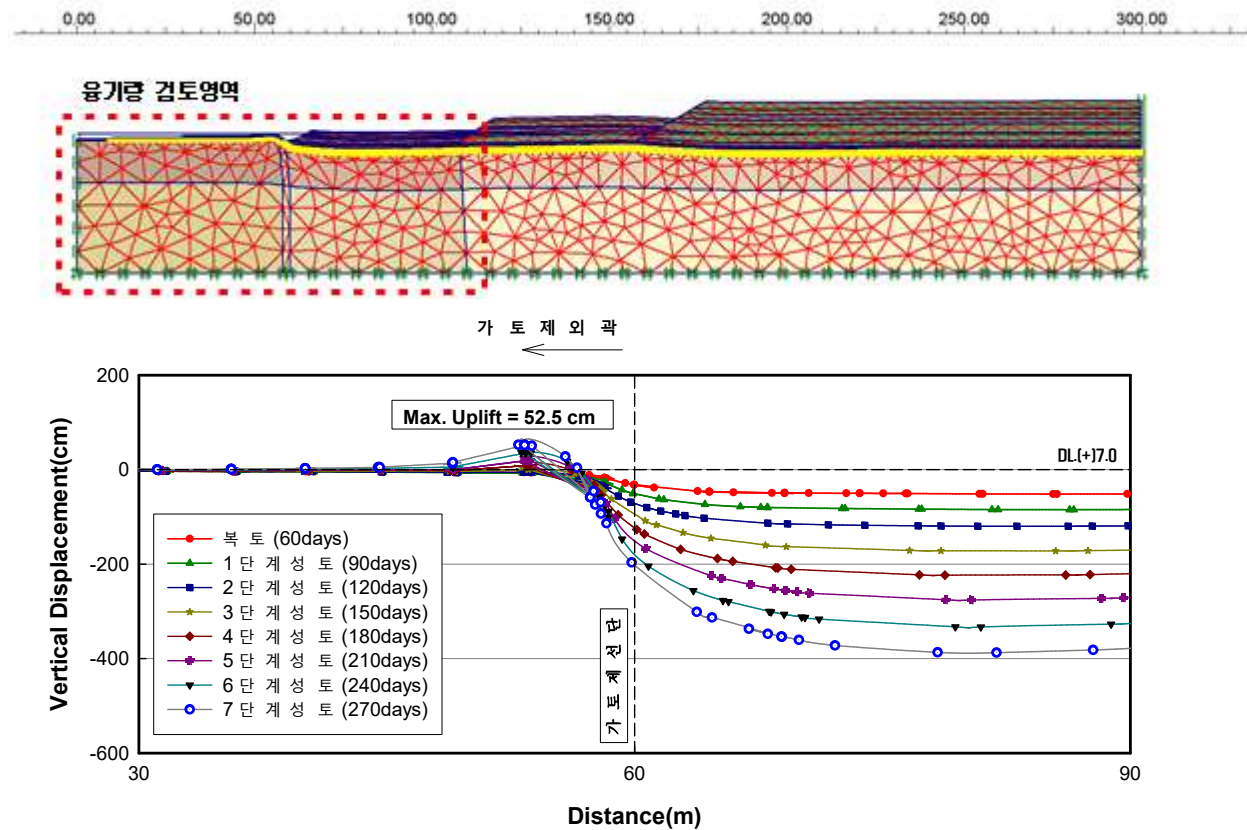
- 가토제 외곽부 해석 결과 분석 – 수평 변위량



구 분	최대수평변위(cm)				
	A (-10m)	B (-50m)	C (-100m)	D (-200m)	E (-300m)
복 토 (60일 경과)	0.92	3.02	0.65	0.03	0.002
1단계 성토(90일 경과)	2.53	3.58	0.76	0.04	0.002
2단계 성토(120일 경과)	6.83	4.62	0.98	0.05	0.002
3단계 성토(150일 경과)	12.98	5.90	1.26	0.06	0.003
4단계 성토(180일 경과)	18.09	6.52	1.39	0.07	0.003
5단계 성토(210일 경과)	23.18	7.12	1.52	0.08	0.004
6단계 성토(240일 경과)	31.24	8.31	1.78	0.09	0.004
7단계 성토(270일 경과)	38.50	9.15	1.96	0.10	0.005

8) 지반 변형 해석

- 가토제 외곽부 해석 결과 분석 – 선단부 융기량



구 분	1단계	2단계	3단계	4단계	5단계	6단계	7단계
최대융기량(cm)	1.9	2.6	3.3	8.9	19.6	36.0	52.5

8) 지반 변형 해석

- 가토제 외곽부 해석 결과 분석 – 성토 단계별 매트 인장력

구 분	매트 인장력(tf/m)	
	PET 매트(20tf/m) 허용인장력= 4.17tf/m	대죽매트 허용인장력= 10.45tf/m
1단계 성토(90일 경과)	2.48	4.15
2단계 성토(120일 경과)	2.00	4.02
3단계 성토(150일 경과)	1.49	3.91
4단계 성토(180일 경과)	1.74	5.20
5단계 성토(210일 경과)	2.19	6.48
6단계 성토(240일 경과)	2.42	7.16
7단계 성토(270일 경과)	2.72	8.08