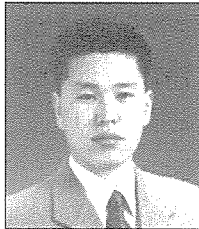


표층처리를 위한 복토 포설방법 사례 연구

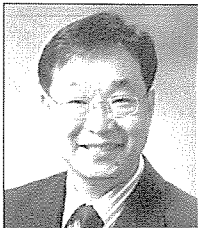
Case Study of Filling Method for Surface Soil Improvement



다산이엔지 지반사업 2부 상무
토질 및 기초기술사
윤 동 덕



다산이엔지 지반사업 2부 차장
반 창 현



현대건설 기술개발원 부장
토질 및 기초기술사
이 승 원



다산이엔지 대표이사
토질 및 기초기술사
오 명 렬

1. 서론

국내에서는 1960년대 간척사업을 시작으로 공유수면 매립에 의한 공업단지, 주택단지, 위락단지 등의 대규모 단지조성 사업과 공항, 부두, 항만 등의 사회간접시설 조성사업이 활발히 진행되고 있다. 대부분의 해안매립공사에는 주위 환경보전 및 공사비절감 등의 목적으로 해저준설공사를 수행하는 경우가 대부분이며, 펌프준설선 등으로 준설하여 매립지에 투입할 경우 매립지반은 초연약지반으로 변하게 된다. 이렇게 조성된 초연약지반은 함수비 및 압축성이 크며, 지지력을 전혀 기대할 수 없어, 시공장비의 진입은 물론 사람의 보행조차도 곤란한 경우가 많다.

준설매립에 의해 조성된 초연약지반을 개량하기 위해서는 우선 표층부의 강도를 증가시켜 시공장비 주행성을 확보할 필요가 있다. 초연약지반상에서의 표층처리공법은 현장조건에 좌우되는 경우가 많기 때문에 현장과 설계의 면밀한 연계작업이 필요하다. 즉 시공시 예상치 못한 문제점이 많이 발생하고 있어 신중한 계획이 요구된다.

일반적으로 표층처리공법으로 적용되고 있는 자연건조공법이나 표층배수공법은 저렴한 공사비로 표층처리가 가능하나 장기간의 시간이 소요되며, 시멘트나 석회계 고화재를 이용한 고화처리공법은 환경오염 문제를 내포하고 있다. 최근에는 토목섬유나 대나무 등을 이용한 Sheet나 Net 부설공법이 점차적으로 확대되고 있는 실정이지만 아직까지 기술적으로 정립되지 않은 부분들이 많은 것으로 조사되었다.

본 사례 연구에서는 준설매립에 의해 조성된 지반의 자연건조에 따른 지지력 발현 특성을 지지면적 개념에 의해 평가하였으며, 표층부의 강도를 증가시켜 시공장비의 주행성을 확보하기 위해 시행되는 복토포설방법에 대한 제반사항을 기술하였다.

2. 준설매립지반의 지지력 평가

준설매립에 의해 조성된 지반은 펄프준설로 인해 다량의 물을 함유한 상태에서 점차 자중압밀에 의한 침강을 시작한다. 그러나 입자가 매우 작아 침강속도는 매우 느리며, 침강이 되지 않은 부분은 슬러리상태를 유지한다. 한편, 준설토 지반의 상부표면에서는 증발에 의한 자연건조층이 형성되기 시작하며, 상당기간 방치해 두면 자연건조층이 점차 두꺼워져 사람이나 일부 장비의 진입이 가능할 정도의 지지력을 가질 수도 있다. 그러나 자연건조층은 깊이가 깊어지면 점차 강도가 작아지다 어느 깊이에서는 완전히 강도를 잃어버리는 특성을 보이기 때문에 Terzaghi나 기타 학자들이 제시한 지지력공식으로는 준설매립지반의 지지력을 정확하게 예측할 수 없다.

또한 표층처리공법을 선정함에 있어 선행되어야 할 우

선과제는 준설매립지반의 지지력을 정확하게 평가하여 표층처리에 사용되는 공사장비의 진입가능성 여부를 판단하는 것이다. 따라서 본 사례연구에서는 준설매립 후 상당기간 방치상태로 자연건조층이 형성된 광양항 동측 배후단지 매립지반을 대상으로 휴대형 콘시험, 표층베인 시험 및 평판재하시험을 실시하였으며, 지지면적 개념을 도입하여 준설매립지반의 지지력을 평가하였다.

그림 1은 자연건조층이 형성된 매립지반에서 실시한 지지력 확인시험 결과를 보인 것이다. 본 조사지역은 준설매립 후 7년간 방치한 지역으로 표층베인시험이나 포터블콘 시험결과 상부 50~60cm정도 자연건조층이 형성되어 있는 것을 확인할 수 있었으며, 평판재하시험 결과 자연건조층의 강도발현으로 인한 준설매립지반 표층부의 허용지지력은 대략 0.5~2.0tf/m²범위에 분포하는 것으로 조사되었다.

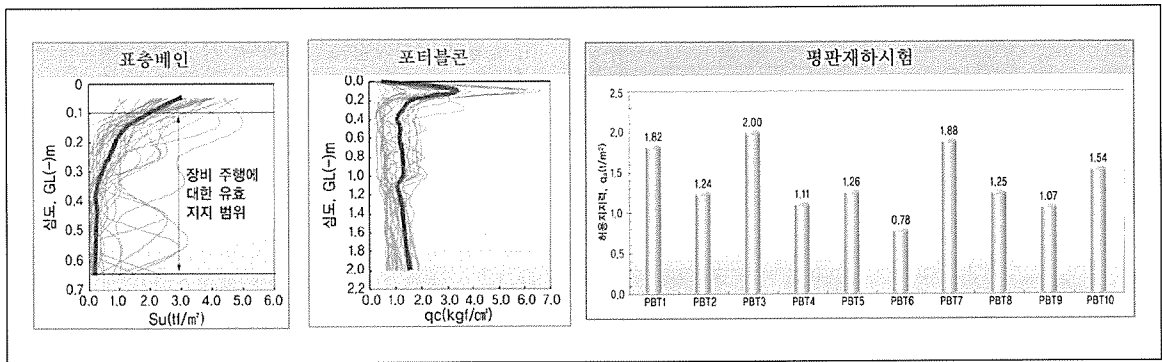


그림 1. 준설매립지반 지지력 확인시험 결과

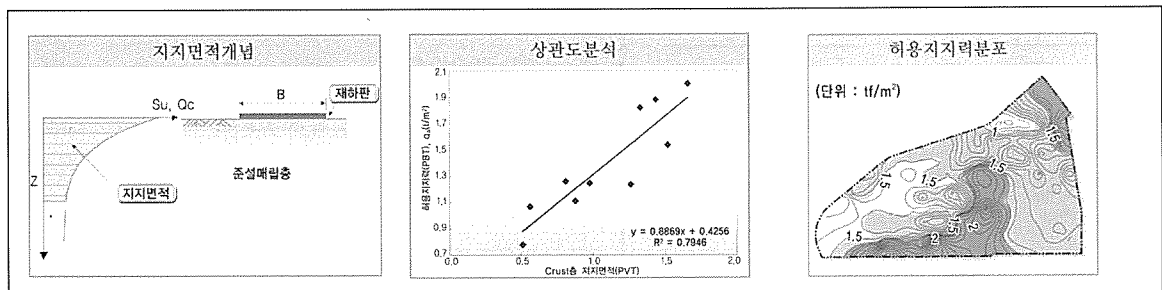


그림 2. 지지면적 개념을 도입한 준설매립지반 지지력 평가

그림 2는 현장시험 결과를 바탕으로 지지면적개념을 도입하여 준설매립지반의 지지력을 평가한 것이다. 준설매립지반의 자연건조층의 강도발현 심도를 장비주행에 대한 허용지지 범위로 가정하여 지지면적으로 환산하였으며, 평판재하시험에서 얻은 허용지지력과 상관성을 분석하여 허용지지력 분포도를 작성하였다. 허용지지력 분포도는 표층처리공법 선정에 활용되어 현장조건에 가장 적합한 공법선정과 더불어 상대적으로 지지력이 취약한 구간에 대한 집중관리를 할 수 있다는 장점이 있으며, 표층처리를 위한 복토시공계획 수립시 안정성을 확보할 수 있을 것으로 판단되었다.

3. 표층처리를 위한 복토포설방법

준설매립지반의 표층처리공법은 지반개량을 위해 필요한 인력 및 장비의 진입을 가능하게 하기 위해 초연약한 상태의 준설매립지반 표층을 개량하여 지지력을 확보하기 위한 것으로서, 표 1과 같이 배수 Trench를 통한 표층배수·자연건조공법, 토목섬유나 대나무 등의 강성을 이용한 피복공법 및 석회계나 시멘트계 안정재를 혼합처리하는 표층 혼합처리공법 등으로 구분할 수 있다. 표층처리공법의 선정은 위에서 살펴본 준설매립지반의 강도특성, 필요로 하는 개량효과, 경제성, 시공성, 안정성 및 시공기간 등을 감안하여 결정해야 한다.

표 1. 표층처리공법 종류 및 특성

구분	토목섬유+복토	대나무Net+복토	PTM+G/T+복토	표층고화처리	경량혼합토+G/T+복토	G/T+로프Net
공법개요	<ul style="list-style-type: none"> 복토에 의한 지지력과 Mat의 인장강도에 의해 Trafficability 확보 토목섬유가 상부토사의 함몰을 방지하는 공법 	<ul style="list-style-type: none"> 대나무의 재료적, 역학적 장점을 이용하여 장비주행성 확보는 물론 지반의 국부파괴, 불규칙 침하억제하는 공법 	<ul style="list-style-type: none"> 표층에 Amfirol 장비를 이용하여 Trench를 단계적으로 시공하여 시간경과에 따른 표층강도를 확보하는 공법 	<ul style="list-style-type: none"> 석회계나 시멘트계 안정재를 슬러리 상태에서 연약토에 혼합 첨가하여 지반개량하는 공법 	<ul style="list-style-type: none"> 준설토 침강후 경량 혼합토 포설 경량혼합토 강도발현후 G/T 부설 후 Sand Mat 포설 	<ul style="list-style-type: none"> 준설토 표면을 토목섬유로 피복, 밀폐하고 그 위에 로프를 격자상으로 포설하여 토목섬유에 걸리는 힘을 균등분포하여 지반을 보강
장점	<ul style="list-style-type: none"> 공종이 단순하며 공사비 유리 시공성 및 공정관리 양호 시공경험 풍부 장비조합에 의한 시공속도 조절 용이 	<ul style="list-style-type: none"> 대나무는 역학적으로 휨강성이 크고 인장과 비틀림 저항성 우수 중공단면이며 경량 재료로 상당한 부력을 가지고 있음 신기술지정(290호) 	<ul style="list-style-type: none"> 자연건조에 의한 표층강도 증가로 여유공기 확보시 경제적 지반이 실트질이나 모래질이 많은 경우 효과 	<ul style="list-style-type: none"> 표층처리후 단기간 내에 장비진입가능 표층의 강도증가와 내구성이 증대 	<ul style="list-style-type: none"> 공기단축에 유리 경량토이므로 구조물 배면에서 작용하는 토압감소 준설토를 활용하므로 재료절감 효과 	<ul style="list-style-type: none"> 지반의 양압력을 활용하여 단기간내 토사복토 시행가능 토사의 균등포설가능 로프의 하중분담효과로 토목섬유 손상 최소화
단점	<ul style="list-style-type: none"> 표면수가 있는 초연약 준설토층 Mat 포설 및 복토 불가 자중압밀이 클 경우 배수로 경사유지곤란 성토시 하방발생 계절적 영향에 민감 	<ul style="list-style-type: none"> 습지도지에 의한 토사복토시 토목섬유 파단 및 하방유류 조립과정이 필요하므로 공중 복잡 재료수급 및 품질관리 곤란 치환깊이가 적어 장기침하유류 큼 	<ul style="list-style-type: none"> 협소한 공간에 활용시 비경제적 초연약지반을 주행할 특수장비 필요 표층강도 발현에 장기간 소요 	<ul style="list-style-type: none"> 표층이 단단한 경우 드레인 타입 천공이 필요 Drain 타입시 표층처리층의 파손으로 강도저하 혼화제의 사용과 양생속도나 강도효과 불확실 지반오염 및 품질관리 난이 	<ul style="list-style-type: none"> 준설토에 시멘트와 기포 주입으로 공사비 증가 경량 혼합토 처리위한 별도의 Plant 설치필요 국내 시공사례 없음 	<ul style="list-style-type: none"> 국내 시공사례 없음 로프의 고정간격이 길면 인장력이 작아짐 내부토제가 필요

표 2. 지지력 검토 제안식

구분	개념도	계산방법
Terzaghi 제안식		$F_s = \frac{Q_d}{Q}$ $= \frac{acN_c + \frac{2T \sin \theta}{B} + \frac{T}{\gamma} N_q + \gamma D_f N_q}{Q_B + Q_M}$
Meyerhof 제안식		$q_a = \frac{1}{F_s} \left[(1 + 0.2 \frac{b}{L}) \cdot 5.14 \cdot c_u + \gamma H^2 (1 + \frac{b}{L}) \cdot (1 + \frac{2D_f}{H}) \cdot \frac{K_s \cdot \tan \theta}{b} + \gamma \cdot D_f + \frac{2T_a \cdot \sin \theta}{B} \right]$
Yamamoto 제안식		$q_a = \frac{1}{F_s} \left\{ (1 + \frac{H - D_f}{b}) \cdot \left[5.3c_u + T_a \cdot \left(\frac{2 \sin \theta}{b} + \frac{1}{r} \right) + \frac{4S_a \cdot R(1 - \cos \theta)}{b + H - D_f} \right] + \gamma D_f \right\}$

표층처리를 위한 복토포설은 연직배수재 타설장비의 주행성을 확보할 목적으로 시행되는 것으로, 복토 설계 수행과정은 다음과 같다.

(1) 설계조건 설정

지층발달 상태, 각 층(원지반, 준설매립토, 샌드매트, 복토 등)의 지반공학특성

(2) 복토단면 결정

복토를 지지할 토목섬유 종류 및 강도, 연직배수공의

배수층 역할을 위한 샌드매트의 필요 두께, 시공장비 주행성 확보를 위한 단계별 복토두께와 층간거리

(3) 시공방법 결정

주행성을 확보하기 위한 표층처리공법, 토목섬유의 혼합 및 포설방법, 복토재의 운반방법, 중기(포설장비, 운반장비, 연직배수재 타설장비 등)

(4) 지지력 검토

준설매립지반의 지지력 대비 시공장비의 진입가능성을

표 3. 지지력 검토결과 예

시공장비	복토두께 (m)	작용응력 (tf/m ²)	토목섬유		허용지지력(tf/m ²)			판정
			안전율	인장강도(tf/m)	Terzaghi	Meyerhof	Yamanouchi	
벨트컨베이어	0.3	1.46	2.0	7.5	5.07	3.00	3.91	OK
습지도저(7)	0.8	2.01	2.0	7.5	8.77	4.56	15.14	OK
중형도저(13)	1.3	2.90	2.0	7.5	8.00	5.28	15.23	OK
대형도저(19)	1.8	3.75	2.0	7.5	8.32	7.33	19.30	OK
PBD 장비	2.0	5.03	4.0	3.75	5.06	7.28	12.08	OK

판단하여 표층처리 필요성을 결정하며, 표 2에서 제안한 식을 사용하여 표 3과 같이 토목섬유 소요인장강도, 복토 두께 및 복토단계별 시공장비의 지지력을 검토한다.

(5) 한계평형해석에 의한 안정성 검토

각 시공단계의 복토 두께 및 층간거리에 대해 원호활동을 검토하여 시트나 네트 등 지오텍스타일에 작용하는 인장강도가 적용 지오텍스타일의 인장강도 이하임을 확인한다.

(6) 시공계획의 결정

위의 검토 결과를 바탕으로 초연약지반에서의 주행성 확보를 목적으로 표 4와 같이 복토 시공계획을 수립한다.

4. 복토포설장비

전통적인 표층처리공법은 자연 방치 후 토목섬유를 포설하여 지반 지지력을 증가시키고 그 상부에 모래 및 토사를 직접 복토하는 방법이 적용되는데, 이때 연약점성토층이 갖는 지지력 이상의 국부적인 하중이 실리게 되면 지반이 함몰(침하) 및 용기가 발생하여 공사에 차질이 생긴다. 이를 방지하기 위하여 최근에는 콤프레샤와 배사관, 크레인을 이용한 스프레이 방식이나 모래포설 전용장비인 벨트컨베이어에 의한 모래포설 등이 사용되고 있다. 전자는 공정이 단순하고 시공기간이 긴 경우 매우 경제적이며 복토포설장비가 직접적으로 연약지반에 진입하지 않고도 복토를 수행할 수 있어 안정적이다. 후자의 경우 장비 조합에 의한 시공속도 조절이 용이하고, 지반교란을 최대한 억제하여 안정성을 확보할 수 있다는 장점을 지니고 있다. 이러한 특성으로 인하여 최근 들어 각종 포설장비의 개발로 표 5와 같이 포설방법이 다양화되고 있는 추세이다.

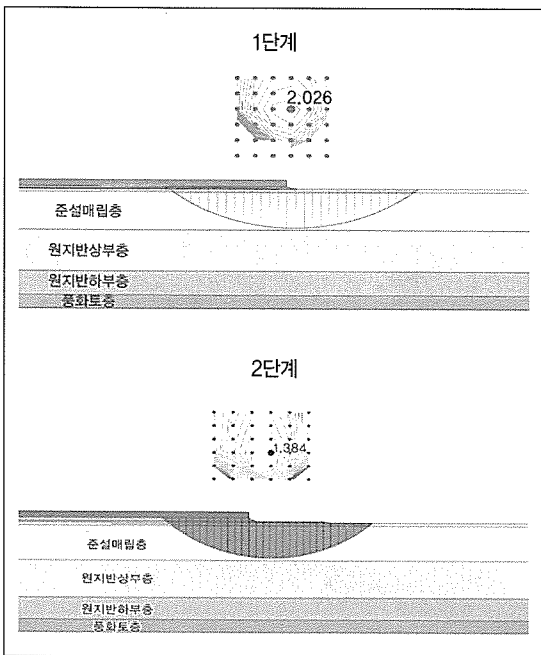


그림 3. 한계평형해석 결과 예

표 4. 복토시공계획 예

구분	1단계 쇄석(0.3m)	2단계 쇄석(0.5m)	3단계 산토(0.5m)	4단계 산토(0.5m)	5단계 쇄석(0.2m)
복토 계획					
적용 장비	벨트컨베이어	습지도저(7)	중형도저(13)	대형도저(19)	PBD장비
중량(t)	14.5	7.64	13.1	19.0	82.39
폭(m)	1.52	0.64	0.77	0.76	0.75
길이(m)	2.74	2.98	2.61	2.80	4.47
접지압(t/m²)	1.16	2.02	3.26	4.46	12.3

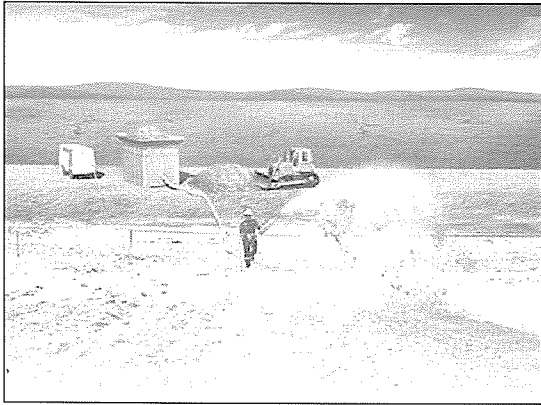
표 5. 복토표설장비 비교

구분	습지도저	벨트컨베이어	고압건식	강압건식
개념도				
개요	• 경량의 습지도저로 직접포설	• 벨트컨베이어로 공중살포	• 배사관을 이용하여 균등포설	• 호퍼에 모래공급 인력포설
장점	• 공기 및 경제성 유리	• 내부 분리도제 불필요	• 균등포설	• 인력포설
단점	• 용기토 발생	• 산토복토 가능	• 산토복토 곤란	• 산토복토 곤란

5. 국외(일본)의 복토표설장비

일본에서는 불도저가 진입할 수 없는 초연약지반에서 표층처리를 위한 복토표설장비로 국내의 벨트컨베이어 공법과 유사한 제트컨베이어 공법이 이용되고 있다. 제트 컨베이어 장비는 국내의 벨트컨베이어 장비보다 작업속

도가 빠르고 투사거리도 긴 것이 특징이다. 또한 소형 운반장비인 캐리어와 고르기 장비인 습지도저를 사용하고 있으며, 이 장비들은 접지압이 국내장비 보다 작은 것이 특징이다.



(a) 제트컨베이어(포설장비)



(b) 캐리어(소형운반장비)

그림 4. 일본의 복토포설장비

(1) 제트컨베이어 장비

- 장비 보유 회사 : 몇 개 회사가 있음
- 원리 : 고속으로 회전하는 2대의 벨트 컨베이어로 토사를 투입
- 적용지반 : 불도저가 들어갈 수 없는 초연약지반
- 장비제원 : 표 6 ~ 표 8 참조

표 6. Shooting Machine 장비 제원(미쓰이 트리머)

형식	TR-100	TR-200	TR-100-1	TR-120-2
투사거리(m)	2.5~8	3~10	6~28	5~20
투사각도(m)	-10°~25°	5°~25°	30°~50°	30°~45°
투사용량(t/h)	10	20	100	120
회전각도	좌우각도 20°	좌우각도 30°	-	좌우각도 45°
호퍼 용량(m³)	0.3	1.0	-	-
동력(kW)	5.5	7.5/5.5	10	11/5.5
주행	솔리드타이어	공기압 타이어	공기압 타이어	공기압 타이어

표 7. Shooting Machine 장비 제원(무라다 건기)

형식	JC-500	JC-700	JC-900	JC-1200
전체 길이(mm)	2,300	2,950	2,500	3,500
전체 높이(mm)	1,020	1,550	1,450	2,150
전체 폭(mm)	1,020	1,900	1,450	2,000
투사거리(m)	5~20	5~20	10~20	5~15
투사고도(m)	8	7	7	5
투사능력(t/h)	35~60	60~80	80~100	220~350
벨트 폭(mm)	500 × 3P	700 × 3P	900 × 3P	1200 × 4P
동력(kW)	7.5	10.0	15.0	19.0
중량(kg)	450	1,000	1,300	3,000

표 8. 제트 컨베이어 장비 제원

구분	제트 컨베이어	벨트 컨베이어	호퍼앤스크류 컨베이어
중량	3200kg	520kg	2080kg
길이	3500mm	7300mm	4100mm
폭	1520mm		
높이	2000mm		2000mm

표 9. 캐리어 제원

구분	구보타 RC-23PL	히타치건설 CH-M 10-2	닛산 NC-3000
최대적재하중(kg)	2,300	2,000	2,500
접지압(kg/cm ²)	0.29		0.23~0.48
엔진 출력(PS)	13		38
캐리어	크롤러	크롤러	크롤러

(2) 소형운반장비 : 캐리어(표 9 참조)

(3) 고르기 장비 : 습지 불도저(표 10 참조)

6. 결론

준설매립에 의해 조성된 지반의 자연건조에 따른 지지력 발현 특성을 지지면적 개념에 의해 평가하였으며, 표층부의 강도를 증가시켜 시공장비의 주행성을 확보하기 위해 시행되는 복토포설방법에 대한 제반사항을 기술하였다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 표층베인시험이나 포터블 콘 시험결과 상부 50~60cm정도 자연건조층이 형성되어 있는 것을 확

인할 수 있었으며, 평판재하시험 결과 자연건조층의 강도발현으로 인한 준설매립지반 표층부의 허용지지력은 대략 0.5~2.0tf/m²범위에 분포하는 것으로 조사되었다.

2) 현장시험 결과를 바탕으로 자연건조층의 강도발현 심도를 장비주행에 대한 유효지지 범위로 가정하여 지지면적으로 환산하였으며, 평판재하시험에서 얻은 허용지지력과 상관성을 분석하였다. 상관성 분석 결과 80%정도의 상관성을 갖는 것을 확인하였으며, 이를 바탕으로 준설매립지반 전체구간에 대한 허용지지력 분포도를 작성하였다.

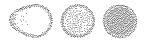
3) 표층치리를 위한 복토설계 흐름을 파악하고, 허용지지력 분포도가 작성된 준설매립지반에 대한 설계과정을 일례로 제시하였다.

4) 현재 국내외에서 사용되는 복토포설장비에 대한 사항을 정리하여 그 특징을 비교분석 하였으며, 작업효율 및 지반파괴에 대한 안정성이 유리한 장비를 적용하는 것이 바람직할 것으로 판단되었다.

이상의 사례연구를 통해 준설매립지반의 표층치리를 위한 복토설계 과정은 매립지반의 강도, 현장조건, 토목섬유 및 복토재 등의 재료특성과 시공장비 조건 등에 따라 달라질 수 있으며, 추후 이러한 제반사항들에 대한 연구를 통해 보다 합리적인 설계기준 정립이 필요할 것으로 판단된다.

표 10. 습지 불도저의 제원

형식	코마츠 D-20P-1(L) (습지)	코마츠 D-20PL-2(SL) (조습지)	미쓰비시중공 BD2F-(SL)	미쓰비시중공 BD2F-(USL)
중량(kg)	3,780	3,880	3,950	4,550
전체 길이(cm)	3,210	3,350	3,310	3,430
전체 폭(cm)	1,820	2,190	2,260	2,850
접지압(kg/cm ²)	0.22	0.15	0.15	0.11

**[참고문헌]**

1. 윤길림, 지성현, 이용길, 이만수 (1996), "Piezocone과 Field Vane Test를 이용한 연약지반의 비배수전단강도의 추정", 한국지반공학회 '96 가을학술발표회 논문집, pp.285-292.
2. 이영남, 이인모 (2002), 매립지반의 표층고화공법 연구보고서, 현대건설기술연구소.
3. 이승원, 지성현, 유석준, 이영남 (2000), "준설패립 점토지반의 침강·압밀거동", 한국지반공학회 논문집, 제16권, 제4호, pp.149-156.
4. 이승원, 주재우, 그 외 (2003), 해상준설토 지반의 지지력에 관한 연구, 현대건설기술연구소.
5. 이승, 김수삼 (1996), 해안매립과 연약지반 개량을 위한 신기술 개발, 중앙대학교 부설 생산공학연구소, 삼성중공업(주) 건설기술연구소.
6. 주재우, 서계원 (2004), "토목섬유-샌드매트 설계에 있어서 야마노우치 제안식의 개선연구", 2004 선진화 해안도로 건설을 위한 국제 Symposium, 목포해양대학교.
7. 한국지반공학회 (1999), 준설패립과 환경매립, 구미서관.
8. Bowels, J. E. (1996), Foundation Analysis and Design, 5th Edition, The McGraw-Hill Companies, Inc.
9. Been & Sills. (1981) "Self-Weight Consolidation of Soft Soils - An Experimental and Theoretical Study", Geotechnique, Vol.31, No.4, pp.519-535.
10. Bjerrum L. (1972) "Embankments on Soft Ground", Proceedings of the Speciality Conference on Performance of Earth and Earth Supported Structures, ASCE, Vol.2, pp.1-54.
11. De Beer, E. E. (1970) "Experimental determination of the shape factors and the bearing capacity factors of sand", Geotechnique, 20, pp.387-411.