



이용길\*

## 1. 머리말

최근 남해안과 서해안 일원의 임해산업단지 개발을 위하여 해면 매립을 통한 부지 개발이 활발히 이루어지고 있다. 국내 해면 매립이라 하면 주로 토석재가 주요 매립재료로 이용되어 왔으나, 매립재료의 확보를 위한 토취원 개발이 환경문제로 인하여 어려움을 겪고 있으며, 공사비가 날로 증대되고 있는 문제점을 해소하기 위하여 해상점토를 준설하여 매립하는 공법의 개발에 대한 기술적 관심이 고조되고 있다.

울촌 제 1지방산업단지조성사업은 산업단지 전면의 항로 준설시 발생하는 준설해성점토를 이용하는 매립 공법을 적용하였다.

준설해성점토로 매립된 부지의 지반 개량을 위한 장비 및 인력의 접근을 위하여 초연약 상태의 매립지반의 표층을 처리하여 조기에 소요의 지반강도를 확보할 수 있는, PTM 공법이라 불리는 표층안정처리기술을 개발하였다. 본 공법이 국내 최초로 체계화되어 시행되고 있는 기술선도형 공법이므로 복토를 실시할 때 발생하는 예상문제점을 분석하기 위하여 당 현장은 시험시공 프로그램을 두차례에 걸쳐서 수행하였으며, 1차로 시행된 죽네트 시험시공, 2차는 강판가도 시험시공을 수행한 후 그 결과를 정리하여 본 성토공법을 개발하기에 이르렀다.

## 2. 현장 현황

\* 정희원, 현대건설주식회사 울촌제1지방산업단지조성공사 현장

### 2.1 현장 개요

- 공사명 : 울촌제1지방산업단지 조성공사
- 위치 : 전남 순천시 해룡면, 여수시 울촌면, 광양시 광양읍 일원
- 면적 : 279만평(현대 대항개발 160만평, 전라남도 공영개발 119만평)
- 공사기간 : 1994년12월17일~2005년12월31일
- 사업비 : 6542억원(현대 4316억원, 전라남도 1376억원, 민자 850억원)
- 시행자 : 전라남도
- 시공자 : 현대건설(주) 외 2개사

### 2.2 추진 경위

당 현장은 산업단지 조성을 위하여 대규모로 준설매립을 시행하는 현장으로서 준설매립후 표면건조층형성을 위하여 19개월간 PTM 공법이 시행되었다. PTM 공법 종료후 1.5m 성토를 실시해야 하는데 초연약지반위에 성토하기 위한 경제적이고 효율적인 방법을 모색하는 과정에서 본 공법이 개발되었다.

- 단지조성공사 착수 : 1994/12/24
- 배수로망의 단계적 조성을 통한 초연약지반의 표층자연건조처리공법(PTM) 신기술 지정 : 1998/11/07
- PTM 공법 적용 : 1998/12(19개월간)
- 죽네트공법 시험시공 : 2001/10(3개월)
- 강판가도 성토공법 개발 : 2003/03~2003/06



### 3. 성토보강공법

#### 3.1 단계적인 복토시공

초연약지반에서 지반의 파괴 및 변형을 최소화할 수 있는 복토시공방법의 기본은 양방향 단계성토방법이다. 이때 중요한 것은 각 단계별 성토고 및 이격거리, 그리고 성토재 포설을 위한 시공장비의 조합과 성토재의 대규모 운송방법 등이다. 각 단계별 성토고는 0.5m씩 성토고를 증가시키는 것이 합리적이며, 각 단계별 이격거리는 20m 정도가 적당한 것으로 판단된다. 또한 양방향으로 동시에 단계성토를 시공하여 저면보강매트의 보강효과를 최대한 발휘하고 압성토로서의 지지력도 충분히 발휘할 수 있도록 하는 것이 중요하다.

#### 3.2 소규모 블록화 방안

블록의 크기가 가로 1,800m, 세로 800m인 대블록을 일시에 복토시공하는 데는 한계가 있다. 초연약지반에서 효율적이고 안정적이며, 경제적인 복토시공을 위해서는 복토 구역을 소규모로 블록화하여 시공하여야 한다. 일반적으로 단위 복토 블록은 가로, 세로 100~250m 범위로 정하는 것이 합리적이다.

#### 3.3 강제치환공법

강제치환공법은 양질토를 연약지반위에 성토하여 그 하중으로 기초지반에 파괴를 일으켜서 연약토를 배제하고 양질토로 치환하는 공법으로 치환즉시 장비 주행성 확보가 가능하다.

#### 3.4 표층고화처리공법

중장비 이동을 위한 가도로 구간을 표층고화처리공법을 이용하여 축조하는 방법으로, 표층고화처리공법은 시멘트계 혼화제를 이용하는 방법과 플라이

애쉬계 혼화제를 이용하는 방법이 있다. 고화처리단면은 그림과 같이 폭 10m, 깊이 1.5m로 처리하고 그 위에 Geotextile Mat를 포설하고 1m 두께의 산토 포설로 중장비의 이동이 가능하게 하는 공법이다.

#### 3.5 배수재를 이용한 압밀촉진공법

저면보강매트와 단계성토만으로 중장비의 주행성을 확보하기 위해서는 하부 준설매립지반의 강도를 현재보다 크게 증가시킬 필요가 있다. 지반의 강도증진을 위하여 배수재를 설치한 후 성토를 실시하며, 성토고는 하부지반의 교란을 최소화하면서 강도증진 효과를 기대할 수 있는 높이로 한다. 성토전의 전단강도에 의한 지지력과 성토후의 지지력은 압밀도 증가에 따른 강도증가식을 이용하여 산정할 수 있다. 강도증진 후의 지지력이 장비주행에 따른 발생응력보다 크게 되는 압밀기간을 산정하면 소요강도 도달에 필요한 최소 압밀기간을 산정할 수 있다.

#### 3.6 보강재를 이용한 지지력 증대

단기간내에 덤프트럭과 같은 중장비의 운행이 가능하기 위해서는 그림과 같이 중장비 운행구간 하부에 대나무 격자나 Geotextile을 이용한 보강방법이 필요하다.

## 4. 현장 조건 검토

#### 4.1 시공구간

- 1) 시공구간 : Block RA-2 200m × 300m
- 2) 시공기간 : 2003년 02월 ~ 2003년 07월

#### 4.2 시험 및 계측 결과

시공구간의 토질 시험값은 표 1과 같다.

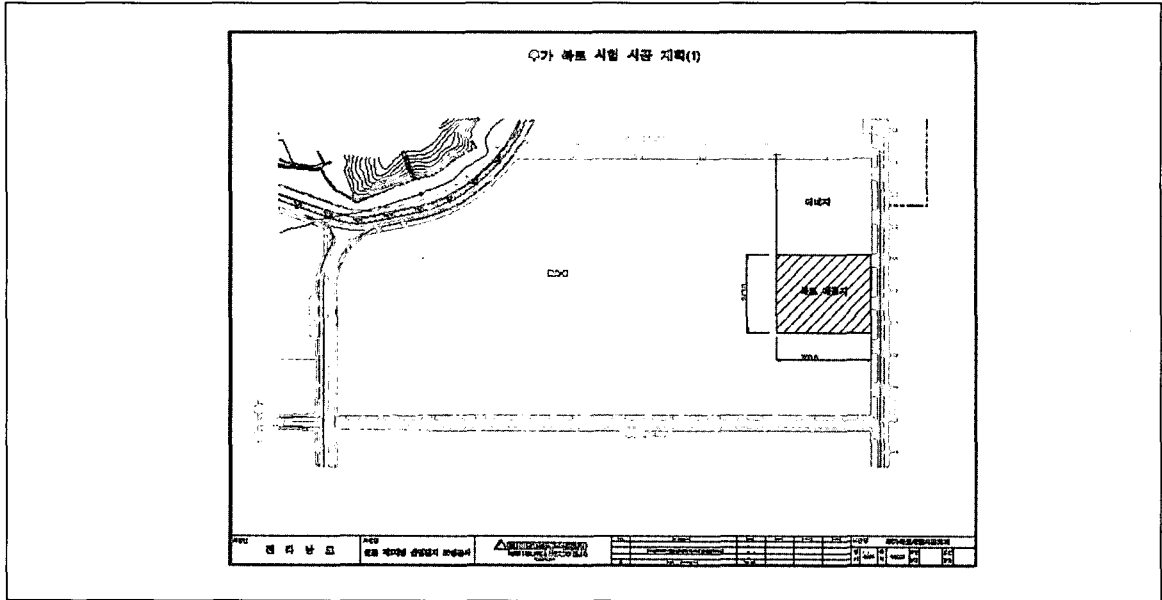


그림 1. 시공위치도

표 1. 토질물성시험 결과 요약

구분	비배수전단강도(t/m <sup>2</sup> )	단위중량(t/m <sup>3</sup> )	압밀계수, Cv(× 10 <sup>-4</sup> cm <sup>2</sup> /sec)	내부마찰각(°)
성토층	-	1.7	-	25
건조층	0.20(교란시)			
	1.01(불교란시)	1.4	1.4	-
준설토층	0.10	1.4	1.4	-

「PTM 적용에 따른 표층부의 지반특성치 조사보고서, 현대건설(주) 2001. 04」

### 4.3 장비 주행성 검토

도저 장비와 덤프트럭에 대하여 충격하중을 고려할 때 장비별 발생응력을 산정하기 위하여 아래 식을 이용한다.

도저를 이용하여 성토 작업시의 충격하중을 고려한 발생응력은 다음 식으로 구한다.

$$\sigma = \frac{W(1+\alpha)}{2(a+2h \tan \theta)} + \gamma h$$

여기서,

$\sigma$  : 발생응력(t/m<sup>2</sup>),      W : 도저의 중량

a : 접지 길이,

b : 접지 폭

h : 포설 두께,

$\alpha$  : 충격계수(=1)

$\gamma$  : 포설되는 흙의 단위중량

$\theta = 30^\circ$  (하중분산각은 30~45°를 사용)

1.5m 성토시 덤프트럭의 후륜하중에 의한 작용응력은 덤프트럭의 제원과 충격계수를 고려하여 아래 식을 이용하여 계산한다.

$$\text{덤프트럭의 후륜하중 } P = 0.4W(1+\alpha)$$

여기서,  $\alpha$  : 충격계수



표 2. 무보강시 충격을 고려한 Trafficability 검토

장비	중량(ton)	발생응력(t/m <sup>2</sup> )	허용지지력(t/m <sup>2</sup> )	비고
습지도저	4	2.11	1.69	N.G.
소형도저	6	2.64	1.51	N.G.
중형도저	20	3.83	2.00	N.G.
덤프트럭	26	3.46	-	-

표 3. 저면매트(15t/m Geotextile) 보강시 충격을 고려한 Trafficability 검토

사용단계	장비	중량(ton)	발생응력(t/m <sup>2</sup> )	허용지지력(t/m <sup>2</sup> )	비고
1단계	습지도저	4	2.11	3.82	O.K.
2단계	소형도저	6	2.64	2.81	O.K.
3단계	중형도저	20	3.83	2.17	N.G.
운 반	덤프트럭	26	3.46	2.83	N.G.

$$\sigma = \frac{P}{(a+2h \tan\theta)(b+2h \tan\theta)} + \gamma_1 h$$

여기서,  $\theta=30^\circ$  (하중분산각  $\theta$ 는  $30^\circ$  사용)  
 $h=1.5m$ (성토고)

이상에서 습지 도저, 소형 도저, 중형 도저, 덤프트럭의 성토 작업시의 발생응력을 구해보면 다음 표 2와 같다.

연약 점성토 지반을 15t/m의 P.E.T 매트를 이용하여 보강한 후 성토를 하면 성토하중은 원지반의 전 단강도에 의해 발휘되는 지지력, 매트의 인장력에 의한 지지력, 재하성토의 압성효과, 침하에 의한 부력 효과에 의해 지지되며, 매트 보강시의 지반의 허용지지력은 다음과 같이 계산할 수 있다.

표 3의 계산결과, 저면매트(15t/m Geotextile)를 보강하여도 충격하중을 고려한 중형도저와 덤프트럭에 대한 Trafficability를 만족시키지 못하는 것으로 나타났다. 따라서, 성토재의 장거리 운반을 위한 중형장비의 진입을 위해서는 추가적인 보강방법을 검토할 필요성이 있다.

## 5. 강판가도공법

북토구역의 소블록화는 북토시 연약지반의 안정성 확보와 대규모 북토물량의 원활한 운송을 위한 중장비(덤프트럭 등)의 이동을 위한 운송로를 확보하기 위한 것이다. 따라서 덤프트럭등의 중장비의 안정적인 이동을 위한 가도로 보강방법은 다음과 같다.

연약지반내에서 덤프 트럭의 장비주행성을 확보하기 위하여 접지압을 크게한 가로,세로가 6m×5m인 강판구조물을 제작하여 가도로를 분할 제작하여 조립해 나가면서 운송시의 하부 연약지반 교란을 최소화하면서 운반로를 확보하는 방법으로 개념도는 아래 그림과 같다.

강판구조물은 H형빔과 강판을 이용하여 제작하여 가도로 사용한다. H형빔은 플랜지가 250mm이고 웨브높이가 220mm이며 두께가 15mm인 철판이며, 빔과빔 사이의 보강판은 가로가 2000mm이고 세로가 750mm, 두께가 200mm인 보강철판이다.

### 5.1 허용 지지력

강판구조물을 가로 6m, 세로 5m 단위구조물이 일체로 거동한다고 가정하고 덤프트럭 1대가 운행시의 지지력을 산정하기로 한다.

- 덤프트럭의 하중  $P = W(1+\alpha)$   
 여기서,  $\alpha$  : 충격계수(0.5적용)

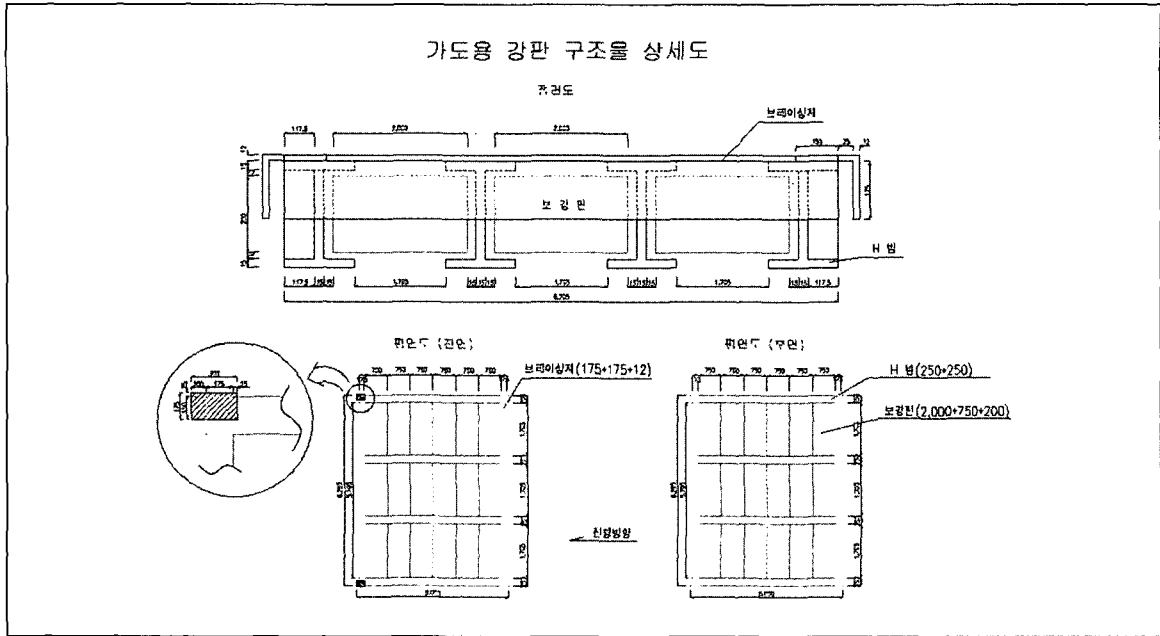


그림 2. 강판구조물을 이용한 가도

- 덤프트럭의 자중 : 26ton
- 충격계수 고려한 하중 : P= 39ton
- 강판구조물의 자중  
: 보강판+H빔+L형보강재  
: 18×280+24.4×72.4+1000=7806kg=7.8ton
- 총 작용하중 : 39+7.8=46.8ton
- 접지압( $\frac{P}{ab}$ ) : 1.56t/m<sup>2</sup>

$$q_a = \frac{1}{2} \left( 0.2 \times 5.144 + \frac{2 \cdot 7.5 \sin 30}{7.73} + \frac{7.5}{10} \right) = 1.37 \text{t/m}^2 (\uparrow \text{방향})$$

지반보강매트면상의 작용력은 0.9-1.37=0.47t/m<sup>2</sup> 이 상향으로 작용하므로 지지력에 대해 안정을 유지한다.

- 토사 1.5m 성토후 지반보강매트위에 작용하는 응력

하중 작용폭

$$B_1 = a + 2htan(\theta) = 6 + 2 \times 1.5tan 30 = 7.73$$

$$B_2 = b + 2htan(\theta) = 5 + 2 \times 1.5tan 30 = 6.73$$

작용응력

$$\alpha = \frac{46.8}{(6.73 \times 7.73)} = 0.90 \text{t/m}^2 (\downarrow \text{방향})$$

- 지반보강매트 포설시의 허용지지력은 인장강도를 이용하여 산정하면,

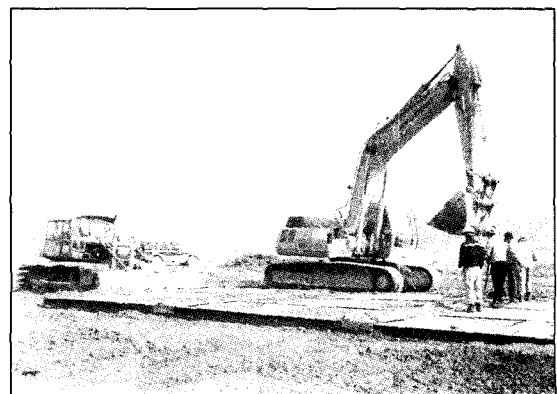


사진 1. 강판가도 설치 전경



사진 2. 강판가도 덤프주행성 확인

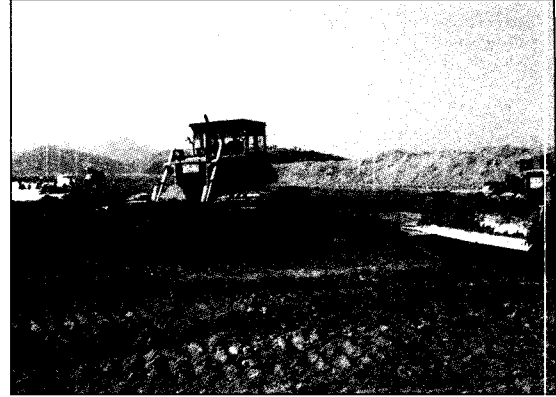


사진 3. 도저 정지 작업

표 4. 압밀도와 침하량 관계

t(일)	압밀도,U	침하(cm)
0	0.00	0.0
30	0.11	8.3
45	0.13	10.0
60	0.15	11.7
90	0.19	14.3

## 5.2 허용 침하량

Terzaghi의 일차원압밀이론에 의하여 압밀침하량 및 압밀소요시간을 계산할 수 있다.

성토고 1.5m인 경우에 대하여 일면배수로 가정하고, 시간의 경과에 따른 압밀도와 침하량 변화를 계산하면 다음 표 4와 같다.

표 4의 계산결과, 1.5m 성토후 강판가도 성토공법을 적용할 때 허용침하량 10cm를 적용하면 45일간 강판가도를 이용한 후 다른 곳으로 이동하여 반복사용한다면 허용침하량 기준을 만족시킨다. 그러므로, PTM 적용으로 형성된 표면건조층에 15t/m의 지반보강매트 포설후 1.5m 복토를 실시한후 강판가도공법을 적용하여 덤프트럭의 주행성을 확보하면 전 면적 성토가 가능한 것으로 판명된다.

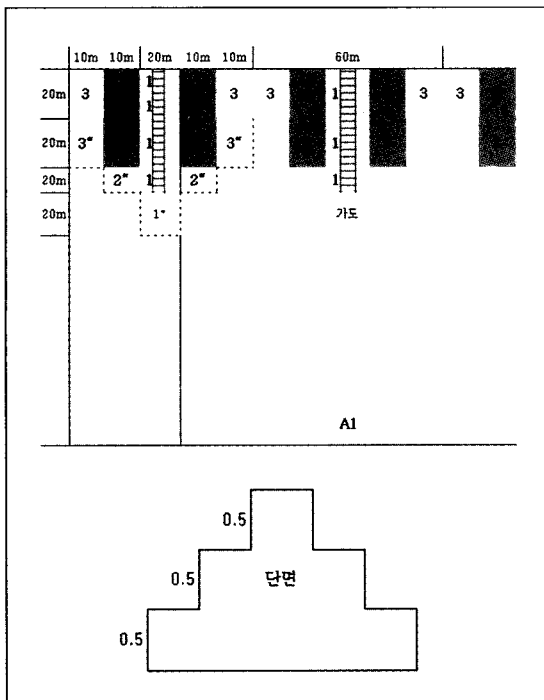


그림 3. 성토시공 방법

## 5.3 성토 방법

시공지역 전면(300×200m)에 15t/m Geotextile 포설

- ② 시공지역을 60×200m로 소블록 5개 구간(A1, A2, A3, A4, A5)으로 분할
- ③ 중장비가 운행할 위치에 폭 6m로 강판구조물을 이용한 가도가설 조립후 덤프트럭 운행
- ④ 가도를 따라서 중앙부에 폭 20m, 두께 1.5m

표 5. 성토공법의 특징 비교

공법구분	강제치환	표층고화	배수재압밀촉진	보강재지지력증대	36강판가도
공법 개요	연약점성토 또는 준설 매립층위에 인위적인 지반파괴를 일으키면서 재하응력과 하부지반강도가 같아지는 임계깊이까지 연약토를 치환	연약점성토 또는 준설 토표층에 시멘트 등 강도증진 효과가 있는 약액을 혼합교반하여 점성토와 혼합재의 복합 지반을 형성하여 강도를 증진시키는 공법	준설매립층 상부에 배수재를 타입한 후 여성을 통해 압밀을 촉진하여 강도를 증진하는 방법	Geotextile 또는 죽네트를 포설하여 인장력을 이용하여 지반을 보강하는 방법	강판가도를 부설하여 작용점지압을 적게하고, 충격에 의한 하중을 감소시켜 중장비 주행성을 확보하는 공법
활용범위 및 적용 가능성	토사의 구득이 용이하며 연약층의 두께가 작거나 연약층의 전단강도가 커서 예상침하깊이가 적을때 적용	가설도로로 이용하거나 블록의 소규모 구분시 적용	최소한 인력으로 배수재 타입이 가능할 정도의 지반강도를 지닌 경우	일방향의 제상단면으로 제체를 시공하는 경우	초연약층 위에 성토시 중장비 가설도로로 이용
공사기간	상대적 장기	단기	장기	상대적 단기	보통
공사비	가장 고가	고가	비교적 고가	보통	저가
기 타	토사 운반거리 작고 구득이 용이할 것		인력 시공이 불가피하며 여성토가 어려워 대규모 적용 불가	하부 지반강도 특성에 따라 보강효과 차이 발생	

- 복토시공
- ⑤ 가도를 중심으로 좌우 양측으로 폭 10m, 높이 1m로 복토시공
  - ⑥ 가도를 중심으로 ⑤번 양측으로 폭 10m, 높이 0.5m로 복토시공
  - ⑦ 소블록 복토 완료
  - ⑧ ②~⑦ 반복으로 전면적 복토 완료

**5.4 주행성 확보를 위한 성토공법별 특징비교**

주행성 확보를 위한 성토공법별 특징비교는 표 5와 같다

**6. 맺음말**

1. 죽네트 공법 현장 시험시공 결과 당초 안정계산한 결과와는 달리 지반의 교란효과 및 1차 복토고 30cm는 너무 적었으며, 죽네트의 겹이음 길이가 부족, 시공단면폭과 형상에 기인한 문제들로

인하여 장비의 주행성을 확보하지 못하는 방법으로 판단되었다.

2. 준설매립연약지반위에 지반보강용 매트를 포설한후 토사 1.5m 성토한 후에도 덤프트럭등의 중장비 주행이 불가능하여 초연약지반상 성토시 중장비의 주행성을 확보하기 위한 방안으로 강판가도공법을 개발하였다.
3. 향후 과제로는 강판가도 공법의 정확한 거동을 파악하기 위하여 하부지반의 정확한 지지력 파악, 하부지반의 전단강도 변화, 지반보강매트의 해석에 대한 추가적인 규명이 더 필요하다고 판단된다.