

# 분체계심층혼합처리공법 시공 사례



채 영 수  
수원대학교 교수



문 한 중  
(주)대왕이엔지 사장  
(hanjoongm@hanmail.net)

## 1. 서론

최근에는 산업화 도시화의 추세에 따라 각종 도시 기반시설 설치 수요가 증가함으로 인해 과거에는 사용하지 않던 연약지반 상에서의 건설이 근년에는 빈번해지고 있다. 국내현장의 시공사례가 많은 SCP (Sand Compaction Pile)는 모래의 고갈과 소음 및 진동에 의한 민원 발생 등의 문제로 어려움이 점점 커지고 있는 실정이다. 심층혼합처리공법은 공장제 원료의 사용으로 수급에 어려움이 크게 없으며, 저진동 저소음의 공법이다.

슬러리방식의 심층혼합처리공법은 고함수비 상태의 연약한 원지반에 물과 혼합된 개량재를 주입함으로써 많은 슬라임량 발생, 낮은 개량효율, 많은 개량재의 주입 등의 단점이 있다. 그러나 분체

방식은 고함수비 상태인 원지반에 분말상태인 개량재를 주입하여 원지반내의 물과 혼합·교반시킴으로서 슬라임이 거의 발생하지 않으며, 교반효율이 높고 개량재의 주입량이 적은 공법이다. 일본에서는 DJM(Dry Jet Mixing Method)이라는 이름으로 이미 1981년 상용화 되었다. 국내에서는 DJM 장비보다 발전된 형식의 분체기와 분사시스템으로 DWDM(Dry and Wet Deep Mixing Method; 분체계심층혼합처리공법)이라는 공법을 2005년에 개발하여 시험시공을 실시하였다. 그리고 2007년에 최초로 국내현장에 상용화된 시공을 실시하게 되었다.

본 글은 국내에 최초로 시공된 분체계심층혼합처리공법을 사용하여 교대의 측방유동방지공을 소개하고자 한다.

## 2. 분체계심층혼합처리공법의 시공원리 및 특징

### 2.1 시공원리

분체계심층혼합처리공법은 연약지반에 분말상태의 개량재를 공급하여 강제적으로 원지반토사와 혼합교반함으로써 흙과 개량재를 화학적으로 반응시켜 지반을 안정시킴과 동시에 강도를 높이는 공법이다. 압축공기반송에 의한 개량재의 연속 공급기술, 흡속에서 개량재와 공기의 분리 및 공기의 회수기술 등의 개발에 의해서 실용화된 것으로, 그 원리는 다음과 같이 되어 있다.

개량재 공급기는 그림 1과 같은 원리를 가지고 있다. 분체공급기하부에 설치된 로타리피더(rotary feeder)의 포켓(pocket)에 들어간 개량재를 피드휠의 회전에 의해 토출부의 압축 공기의 흐름 속에 넣는 것이다.

그리고 분체공급기에서 압축공기의 흐름에 실려진 개량재는 압송용호스와 교반축의 관을 경유하여 교반축에 붙은 분사구에서 흡속으로 분사된다.

분사구로부터 팽속의 공간을 향해서 분사된 개량재와 공기는 압송하는 관의 직경에 비해서 상대적으로 큰 공간에 들어가게 되고 이 공간에서 날개의 회전을 따라 부압이 생기고 공기압력이 급격히 감소하여 개량재의 이동이 곤란한 유속이 된다. 이 때문에 개량재와 공기가 분리되고 개량재는 회전에 의해서 생긴 흡속의 공간에 부착되고, 반회전후에는 분사구의 반대쪽에 있는 날개에 의해서 흙과 교반 혼합된다. 그리고 개량재와 분리된 공기는 교반축의 주위를 따라서 상승하여 배출된다.

이때에 공기의 배출이 순조롭게 되지 않으면 그

뒤에 계속해서 압송되어 오는 공기에 의해 분사효과를 기대할 수 없게 된다. 그래서 교반축의 형상은 공기의 지상방출이 잘되게 하기 위해서 외형을 사각형으로 만든다.

이렇게 시공된 개량체의 일축압축강도는 고화재의 투입량에 따라 선택할 수 있으며, 10~20 kg/cm<sup>2</sup> 이상으로 시공가능하다. 시멘트말크를 이용한 종래의 심층혼합처리공법에 비교되지 않을 정도의 빠른 시간(28일 이내)에 고강도, 고품질의 개량체가 형성되며 적은 양의 고화재를 사용하므로 슬라임도 거의

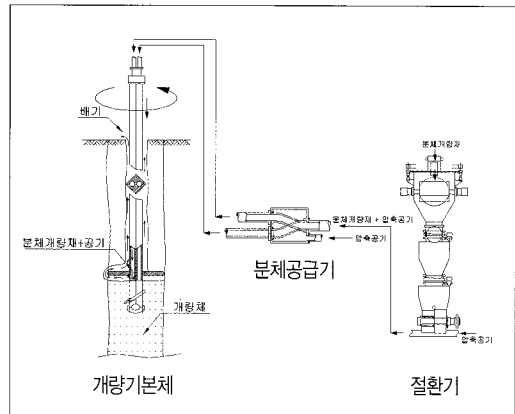


그림 1. 분체계 심층혼합처리공법의 시공 원리

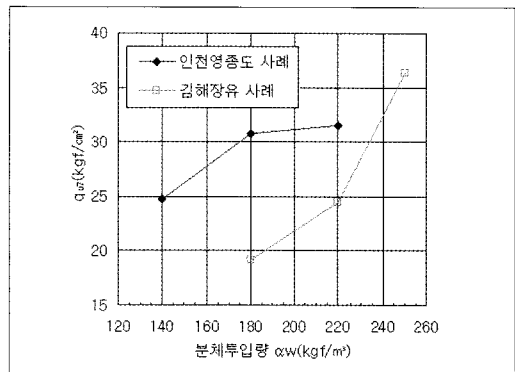


그림 2. 김해장유지역과 인천영종도의 분체투입량에 따른 q<sub>7</sub> 변화 비교

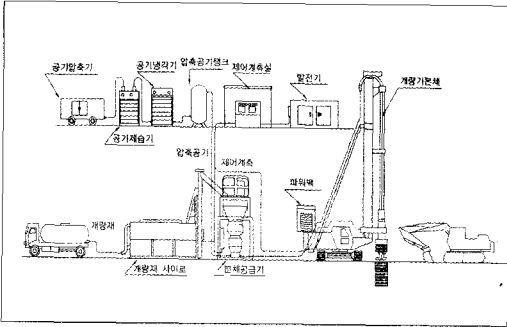


그림 3. 시공기계의 기본구성

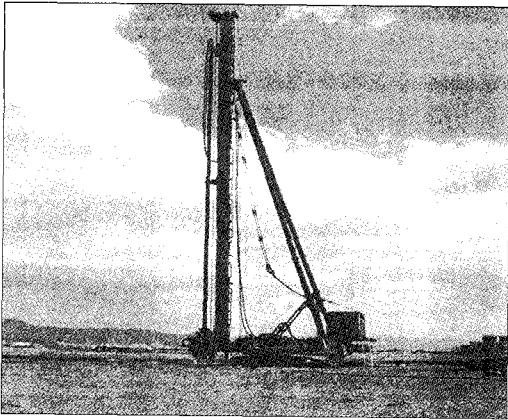


그림 4. 분체계심층혼합처리공법 단축 개량기 전경

발생하지 않는다. 그림 2는 재령이 7일된 개량체에 품질확인 보링을 실시하여 회수된 코어로 일축압축 시험을 실시한 결과이다. 사례에서 TCR과 RQD는 80~100%정도로 높게 측정되었다.

그리고 개량기 본체는 단축이며 직경 1,300mm의 개량체를 심도 30m까지 시공할 수 있다.

## 2.2 분체계심층혼합처리공법의 특징

분체계 심층혼합처리공법의 특징은 다음과 같다.

- (1) 개량강도( $q_u$ )를 자유로이 선택할 수 있다( $q_u = 6 \sim 20 \text{kg/cm}^2$ ).

- (2) 토질과 개량목적에 따라 본체의 시멘트, 생석회, 소석회, 석고, 철광슬래그, 플라이 애쉬 등 자유로이 선택할 수 있다.
- (3) 주입량이 적어 주변지반에 대한 영향이 없다.
- (4) 슬라임이 거의 없다.
- (5) 교반효율이 좋아, 품질의 불균일이 적다.
- (6) 시공현장이 안전하고 깨끗한 공법이며, 우천시에도 시공 가능하다.

## 2.3 개량토의 공학적 성질

심층혼합처리공법에 의한 지반개량을 대상으로 하는 지반은 고함수비의 지반이 많다. 이와 같은 지반을 개량할 경우 개량토는 고함수비 상태 그대로 경화되어 큰 간극을 가진 상태로 고결되는 것이 특징이다. 그 때문에 개량체의 공학적 성질은 암과 연약토의 양자의 성질을 가지고 있으며, 그 역학적 거동도 다음과 같이 복잡하다.

- ① 개량토에 축하중을 가할 경우 하중이 어느 한 계를 초과할 때 시멘트존이 파괴되는 압축현상이 발생한다.
- ② 전단에 의한 체적수축(부의 Dilatancy)이 발생한다.
- ③ 구속압에 의해 전단강도(진류강도)가 변화하는 등의 현상이 발생한다.

통상의 설계에 있어서 이와 같은 복잡한 거동을 반영시키는 것은 쉽지 않다. 따라서 개량체의 시멘트존이 파괴되지 않으면 압축도 생기지 않는 것으로 가정하고 간극수압의 영향을 고려하지 않는 전응력 해석의 조건에 의해 설계되고 있다. 즉, 통상의 설계에 있어서 개량토의 물성은 습윤단위중량과 일축압축강도를 이용하여 설계되고 있다.

## 분체계심층혼합처리공법 시공 사례

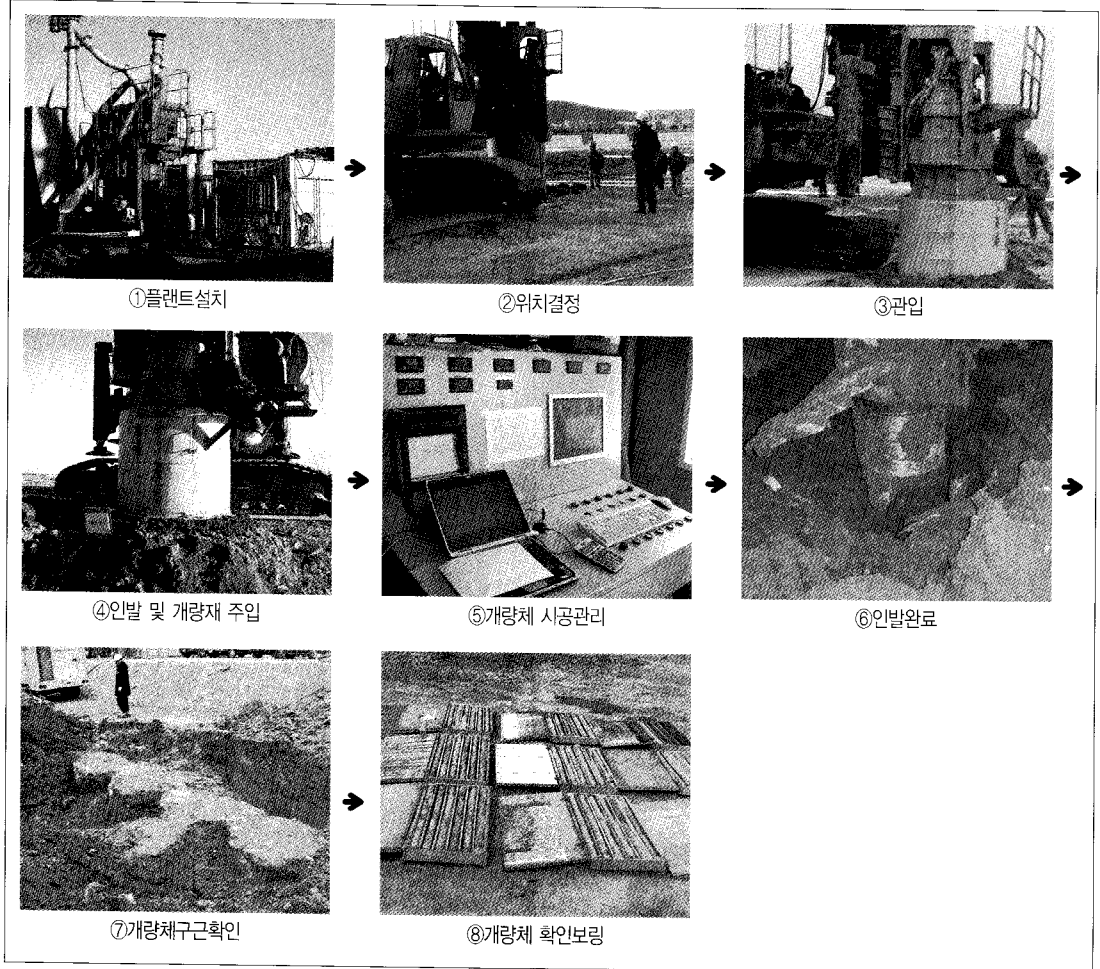


그림 5. 분체계심층혼합처리공법의 기본적인 시공순서

### 3. 분체계심층혼합공법의 시공

분체계 심층혼합처리공법의 시공기계는 그림 3과 같이 개량이 본체 부분과 개량재 플랜트 부분으로 크게 구분된다. 그림 4의 개량이 본체는 개량직경 1300mm이며 단축이다.

분체계심층혼합처리공법의 기본적인 시공순서는 그림 5와 같으며, 우선 개량기 본체의 위치 결정과

교반축의 연직성 확인 후에 교반축을 회전시키면서 개량심도까지 내린다. 이때는 일반적으로 개량재는 분사시키지 않으나 현장의 토질조건 등 분사시킬 필요가 있을 때 분사하며, 분사하지 않을 때에는 분사구가 막히지 않도록 압축공기를 분출시킨다. 교반날개가 개량할 심도에 도달하면 인발과 개량재의 분사 교반을 병행해서 실시한다. 개량재량의 제어는 개량재 공급기에서 분사되는 개량재의 토출량과 교반날

개의 인발속도와의 관계에 따라 결정된다. 또한 개량재의 혼합량을 바꿀 필요가 있을 때에는 시공관리 정밀도 등의 이유 때문에 2~3 토층 이내(1층 두께 3m 이상)로 설정한다. 그리고 시공의 모든 관리는 자동제어계측에 의해 실시된다.

#### 4. 분체계심층혼합처리공법의 설계

심층혼합처리공법에 의해 개량체의 설계는 지지력 특성을 고려하는 방법에 따라 2가지로 대별된다. 첫 번째는 평균적인 지반강도가 발휘되는 복합지반으로 설계하는 방법(항식개량)이 있고, 두 번째는 각각의 개량체들이 연속해서 개량체를 기초구조물로 취급하여 설계하는 방법(블록식)이 있다.

#### 4.1 적용 및 개량형식의 선정

분체계심층혼합처리공법의 적용에 의한 개량형식의 선정은 표 1에 나타난 것과 같이 주요 용도와 개량형식의 예를 참조하여 선정되고 있다.

#### 4.2 지지방식

개량지반의 지지방식으로는 그림 6에 나타난 것과 같이 2종류가 있다. 지지층이 얇은 경우에는 「부상형」을 적용하고 있다.

#### 4.3 개량형식

개량형식은 ① 부분개량과 전면개량, ② 독립배치

표 1. 주요 용도와 개량형식의 예

대상구조물			항식		Block식	
구조물	개량목적		점원식	격자식		
성 토 작은 옹벽 석 적	활동대책	◎	○	○	△	
	침하억지·저감	◎	△	○	△	
	측방변위억지	○	○	○	○	
	지지력확보	○	○	○		
	액상화대책	—	—	◎	△	
절 토	활동대책	○	◎	○	△	
	측방변위억지	○	◎	○	△	
굴 작 토 류 벽	주동토압저감	—	◎	○	◎	
	횡저항증가	○	◎	○	◎	
	Heaving방지	○	○	○	◎	
	지반평창대책	—	—	○	◎	
구조물 옹 벽 Box culvert	침하억지·저감	◎	○	○	△	
	액상화대책	—	—	◎	○	
호 안 건 축	지지력확보	○	◎	○	◎	
	K치증가	—	◎	○	◎	

◎ : 많이 사용됨, 양호    ○ : 보통으로 사용됨    △ : 유효하나 비경제적임    — : 그다지 사용되지 않음

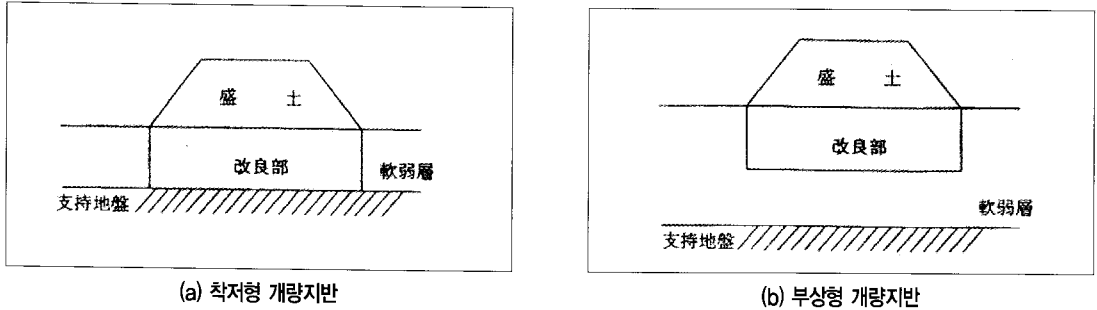


그림 6. 개량지반의 지지방식

(비겹침배치)와 겹침배치(복수의 개량체를 한 개의 개량체로 본다) 및 이를 조합하여 여러 가지 형식을 사용하고 있다. 기본적으로는 항식과 블록식이 있다.

#### 4.4 개량강도의 설정

심층혼합처리공법에 있어서 개량강도는 대상토의 성질, 안정재의 종류, 배합, 겹침조건, 교반방식 등의 많은 요소에 의해 지배된다. 따라서 설계에 이용하는 강도는 원칙적으로 대상토를 이용한 실내배합시험을 실시하여 정하는 것으로 한다.

그리고, 설계기준강도는 산정된 하중의 크기와 개량형식 및 개량폭/개량장(B/D)에 의한 변형형식 등에 의해서 필요한 강도가 달라지는 것에 유의하여 설정한다.

##### 1) 항식개량지반의 설계(복합지반적 설계방법)의 경우

항식개량에 의해 복합지반의 설계에 이용하는 설계기준강도( $q_{uck}$ )는 기본적으로 현장에서 발휘되는 개량체의 일축압축강도  $q_{uf}$ 로 결정하는 것이 좋다.

$$q_{uck} = \gamma \cdot \overline{q_{uf}} = \gamma \cdot \lambda \overline{q_{ul}}$$

여기서,  $q_{uck}$  : 설계기준강도

$\overline{q_{uf}}$  : 현장개량토의 일축압축강도의 평균치

$\overline{q_{ul}}$  : 실내배합시험에 의한 개량토의 일축 압축강도의 평균치

$\gamma$  : 현장강도계수

$\lambda$  : 현장강도  $q_{uf}$ 의 평균치와 실내배합 강도  $q_{ul}$ 의 평균치의 비

(육상공사의 경우  $\gamma \cdot \lambda = 1/2 \sim 1/4$ 로 하는 것이 많다.)

##### 2) 블록식개량지반의 설계(구조물적인 설계방법)의 경우

개량지반에 작용하는 수평외력이 큰 경우에는 개량체를 일종의 지중구조물로서 설계하는 구조적인 설계방법이 이용되고 있다. 이 경우 개량체의 압축응력도, 전단응력도, 인장응력도 등에 대해서 허용치 내에 있는 것을 검토한다.

##### (1) 허용압축응력도( $\sigma_{ca}$ )

$$\sigma_{ca} = q_{uck} \cdot \frac{1}{FS}$$

$$q_{uck} = \gamma \cdot \overline{q_{uf}} = \gamma \cdot \lambda \overline{q_{ul}}$$

여기서,  $\sigma_{ca}$  : 허용압축응력도

$F_S$ : 안전율(상시: =3, 지진시: =2)

$q_{uck}$ : 설계기준강도

$\overline{q_{uf}}$ : 현장개량토의 일축압축강도의 평균치

$\overline{q_{ul}}$ : 실내배합시험에 의한 개량토의 일축압축강도의 평균치

$\gamma$ : 현장강도계수

$\lambda$ : 현장강도  $q_{uf}$ 의 평균치와 실내배합강도  $q_{ul}$ 의 평균치의 비

※ 육상공사의 경우

- 상 시:  $\sigma_{ca} = \left( \frac{1}{6} \sim \frac{1}{9} \right) \cdot \overline{q_{ul}}$

- 지진시:  $\sigma_{ca} = \left( \frac{1}{4} \sim \frac{1}{6} \right) \cdot \overline{q_{ul}}$

## (2) 허용전단응력도( $\tau_a$ )

$$\tau_a = \frac{1}{2} \cdot \sigma_{ca}$$

## (3) 허용인장응력도( $\sigma_{ta}$ )

$$\sigma_{ta} = \eta \cdot \sigma_{ca} \leq (\sigma_{ta})_{max}$$

여기서,  $\eta$ : 실내공시체의 압력인장시험으로부터 0.15

$(\sigma_{ta})_{max}$ : 200kN/m<sup>2</sup>

## 5. OO대교 OP2현장 시공사례

### 5.1 현장개요

OP2의 지반조건 그림 7에 나타내었다. 지반의 해성퇴적층으로 연약지반이 GL-12~15m에 분포하고 이후 지반은 풍화토와 풍화암으로 구성되어 있다.

### 5.2 시험시공

본선 구간에 시공을 시작하기 전 시험시공을 실시

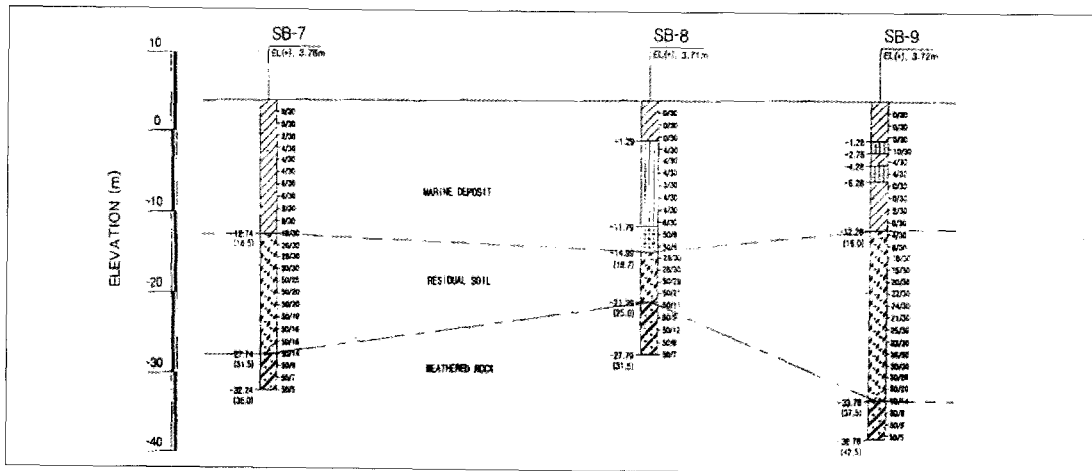


그림 7. 지질주상도

## 분체계심층혼합처리공법 시공 사례

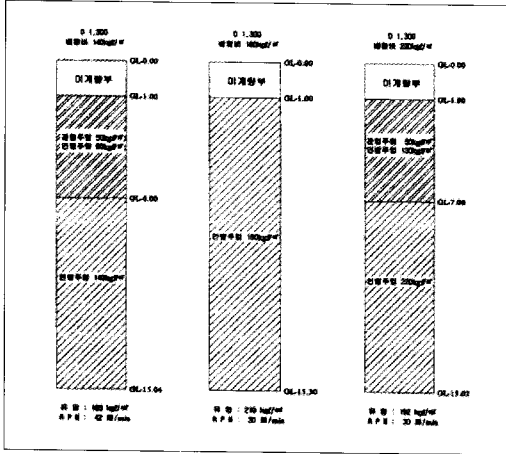


그림 8. 시험시공현황

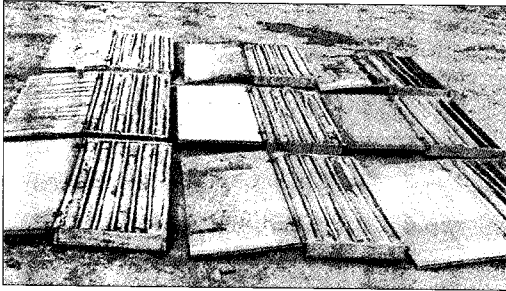


그림 9. 시험시공 품질확인보링

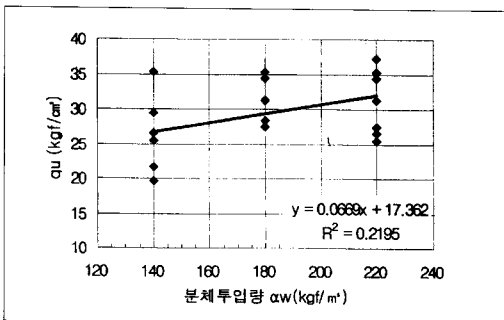


그림 10. 시험시공결과(분체투입량에 따른 일축압축강도의 변화)

하여 00대교 요금소 OP2구간의 시공기준을 마련하였다. 시험시공현황은 그림 8과 같다.

본 분체계심층혼합처리공법에 대한 시험시공 후 개량체의 연속성 및 강도 등의 품질확인, 평가를 실

시하기 위해 약 7일 경과시 시공 전 깊이에 걸쳐 이중관 샘플러를 사용하여 시추조사를 실시하였으며, 시추코어는 그림 9에 나타내었다. 본 구간에서의 교대의 측방이동에 대한 보강공법 검토 시 설계기준강도를  $q_{uck} = 18.0 \text{ kgf/cm}^2$ 이었다.

약 7일 경과 후에 채취된 코어의 평균코아채취율(TCR)은 개량재의 주입량( $\alpha_w$ ) 140, 180 및  $220 \text{ kgf/m}^3$ 에 각각 92, 95 및 88% 이상으로 매우 높게 측정되었다. 특히 인발주입만 실시한  $180 \text{ kgf/m}^3$ 를 주입한 공의 연속성이 가장 좋았다.

채취시료를 상층부, 중층부 및 하층부로 구분하여 재령 7일에 대한 압축강도시험(KS F 2405:2005)을 수행하였으며 그 결과는 그림 10에 나타내었다. 그림 2에서와 같이  $140 \text{ kgf/cm}^2$ 을 투입하여 7일강도는 최소  $20 \text{ kgf/cm}^2$ 로 설계기준강도 이상이 발휘되므로 시험시공의 최소투입량을 투입하기로 결정하였다. 시험시공 결과에 따라 품질 및 강도를 분석하여 표 2와 같은 시공 기준을 수립하였다.

### 5.3 본선구간 시공

시공 기준에 따라 본선구간 561본을 1.5개월에 걸쳐 시공하였다. 본선구간의 시공중 개량체의 구근확인과 주열식벽체의 선형을 확인하기 위해 터파기를 실시하였고 그림 11과 같은 구근을 확인할 수 있었다.

### 5.4 품질확인 조사 및 구근확인

본선구간 시공 후 품질을 확인하기 위해 200공당 1회씩 확인보링을 실시하였다. 그림 12는 품질확인 보링의 시추코어이며 표 3은 품질확인 시추공의 현황을 나타내었다.



표 2. 본선구간 시공기준

설계기준강도( $q_{uck}$ )	개량재	주입량	주입방법	비고
18kg/cm <sup>2</sup>	보통포틀랜드 시멘트	140kg/m <sup>2</sup>	인발주입	

표 3. 품질확인 시추공 현황

공번	시공일	시추공번	시추일자	재령	시공심도	주입량	비고
133	2007-1-8	BH-1	2007-2-13	35일	13.56m	2.67ton	
194	2007-1-25	BH-3	2007-2-14	18일	15.03m	2.84ton	
397	2007-2-5	BH-2	2007-2-13	7일	14.05m	2.51ton	



그림 11. 본선구간 구근확인

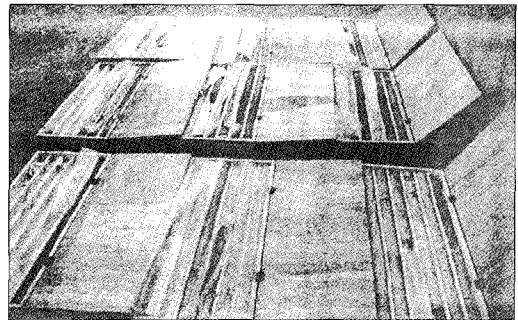


그림 12. 품질확인 시추공

각 시추공의 TCR은 약 100%이며 RQO는 90%~100% 사이의 값을 나타냈으며, 우수한 연속성을 확인할 수 있었다. 본 시공의 분체계 심층혼합처리공법의 채취시료를 상층부, 중층부 및 하층부로 구분하여 압축강도시험(KS F 2405:2005)을 실시하였다. 그 결과는 그림 13에 나타내었다.

심도별 압축강도의 변화는 그림 13에 나타내었다. 개량강도는 가량심도 및 재령에 관계없이 설계기준강도 ( $q_{uck}$ ) 18kg/cm<sup>2</sup> 이상이 발휘되었다. 그리고 본 현장에서 실시된 분체계 심층혼합공법의 시험시공 결과에서의 7일 강도( $q_{u7}$ )와 35일 강도를 28일 강도( $q_{u28}$ )로 가정하여 나타낸 상관관계식은  $q_{u28} = 2.07 \cdot q_{u7}$  인증가특성을 가지고 있는 것으로 평가되었으며, 기존의 연구결과에서는  $q_{u28} = 1 \sim 2.0 \cdot q_{u7}$  범위에서 다소 높게 평가되었다. 그리고 그림 14은  $q_{u7}$ 과

$q_{u28}$ 의 관계를 기존연구와 비교한 것이다.

그림 15은 김해장유지역의 시험시공결과와 본 시공사례 결과를 비교한 것이다. 김해장유지역과 인천의 강도 특성은 큰 차이를 보였다.

실트성분과 모래성분이 우세한 인천영종도지역이 적은양의 개량재료로도 큰 강도를 얻을 수 있는 것으로 판단되었다.

## 7. 결론 및 제언

00대교 OP2구간의 측방유동방지를 위해 분체계 심층혼합처리공법으로 시공하여 품질확인 및 분석하는 과정에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 시험시공을 실시하여 설계기준강도( $q_{uck}$ ) 18kg/cm<sup>2</sup>

## 분체계심층혼합처리공법 시공 사례

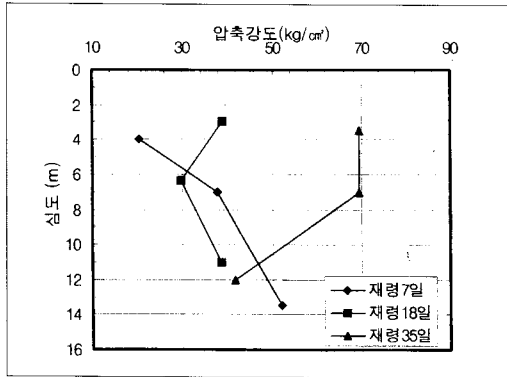


그림 13. 심도별 압축강도의 변화

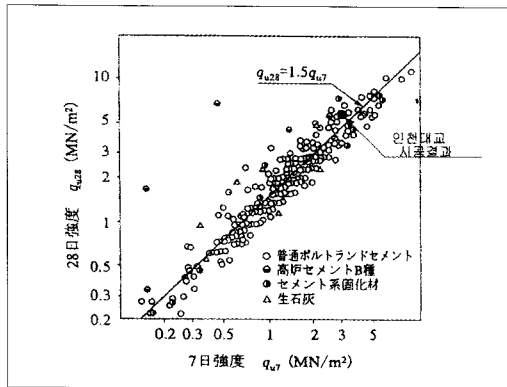


그림 14.  $q_u$ 와  $q_{u28}$ 의 관계(財團法人土木研究センター)

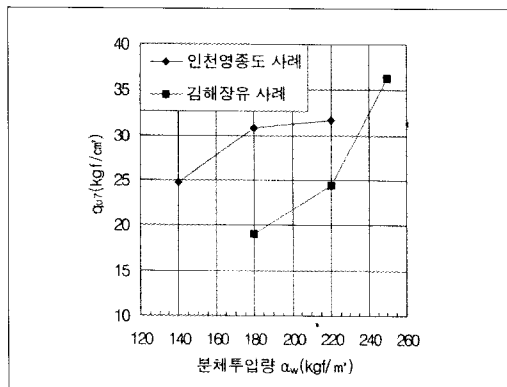


그림 15. 김해장유지역과 인천영종도의 분체투입량에 따른  $q_{u,7}$  변화 비교(대한토목학회)

를 얻기 위해 시멘트주입량은  $140\text{kg/m}^3$ , 인발

주입을 실시하는 기준마련하고 본선구간 시공을 실시하였다.

2) 개량체의 연속성 확인을 위해 시공 후 약 7, 18, 35 일 경과 시에 개량체 전체 심도에 대해 시추 조사를 실시한 결과 코아회수율(TCR)은 약 100%로 매우 높아 품질을 충분히 확보할 수 있었다.

3) 압축강도( $q_u$ )시험을 실시한 결과 재령에 관계없이 설계기준강도( $f_{ck}$ )  $18\text{kg/cm}^2$  이상이 발휘되었다.

4) 7일강도( $q_{u,7}$ )와 35일 강도를 28일 강도( $q_{u,28}$ )로 가정하여 나타난 상관관계식은  $q_{u,28} = 2.07 \cdot q_{u,7}$ 인 증가특성을 가지고 있는 것으로 평가되었으며, 이는 재령 28일 이후에도 강도가 계속 증가하는 것으로 판단되었다.

5) 이상과 같은 결과에 따라 00대교 요금소 구간 OP2의 교대측방유동방지공으로 국내 최초로 적용된 분체계 심층혼합공법은 성공적으로 시공되었다.

6) 분체계심층혼합처리공법의 시공 이후 개량체와 구조물의 거동을 실측한 연구는 아직 실시되지 못한 상황이며, 배합비에 따른 강도자료도 아직 미비한 상황이다. 따라서 앞으로 적용되는 현장에서는 이러한 연구가 계속 진행되어야 할 것이다.

## 참고 문헌

1. (주)대왕이엔씨, 2007, 분체계심층혼합처리공법(DWDM공법) 시공완료 보고서
2. 財團法人土木研究センター, 2004. 3., 陸上工事における深層混合処理工法設計・施工マニュアル改訂版
3. 대한토목학회 부산울산경남지회, 2005. 11. 분립체 심층혼합처리공법(DWDM공법)에 대한 시험시공 결과분석 보고서