

## 교반혼합체로 보강된 흙막이 벽체의 거동 분석 Analysis of Behaviour of Earth Retaining Structure using Cement-mixing Method

김영석<sup>1)</sup>, YoungSeok KIM, 조용상<sup>2)</sup>, YongSang CHO, 강인철<sup>3)</sup>, InCheol KANG, 김인섭<sup>4)</sup>, InSup KIM

- 1) 한국건설기술연구원 지반연구실 선임연구원, Senior Researcher, Geotechnical Engineering Division, Korea Institute of Construction Technology
- 2) 삼성물산 건설부문 품질경영실 T.A.팀 과장, Manager, T.A. Team, Quality Management Division, Samsung C & T
- 3) 삼성물산 건설부문 품질경영실 T.A.팀 부장, General Manager, T.A. Team, Quality Management Division, Samsung C & T
- 4) 삼성물산 건설부문 품질경영실 T.A.팀 전무, Executive Vice President, T.A. Team, Quality Management Division, Samsung C & T

**SYNOPSIS** : Recently, excavations in highly congest urban area have been increased. For the excavations conducted in extremely narrow spaces, we have been developing a novel soil reinforcement system of temporary retaining walls by using deep cement mixing method. The developing method installs larger diameter ( $\Phi=300\sim500\text{mm}$ ) and shorter reinforcement blocks than previous reinforcement system for mobilizing friction with soils, therefore it has advantages of not only shortening the length of reinforcement system but also reducing the amount of reinforcement. In this study, we performed a numerical analysis of the new reinforcement system by using a commercial finite element program, and evaluated the behavior of the reinforced retaining wall system under various conditions of the length, the diameter, the spacing, and the angle of the reinforcement system.

**Keywords** : Soil cement mixing, Earth retaining wall, Ground improvement

### 1. 서론

최근 도심지에서는 토지의 유효 활용을 위하여 협소한 공간에서 대규모 굴착 공사가 증가하고 있다. 이러한 지역에서는 흙막이 굴착공사에 따른 주변지반의 변형을 줄이기 위한 흙막이 지보 공법으로 일반적으로 버팀보 공법, 어스 앵커 공법 및 쏘일 네일링 공법 등이 사용되고 있다. 버팀보 공법의 경우 작업공간의 활용의 어려움이 있고, 현장 내 부지가 넓을 경우 사용에 제약을 받는다. 이 경우 대안으로 어스앵커 공법 및 쏘일 네일링 공법 등이 사용되고 있으나, 이러한 공법들은 굴착 깊이 이상으로 배면지반의 여유가 필요하게 된다. 그러나 최근 도심지 근접공사 현장에서는 인접 구조물 등에 의하여 배면부지가 매우 협소한 경우도 있어, 어스앵커 공법 및 쏘일 네일링 공법을 적용하기 힘든 경우가 발생하기도 한다 (e.g., 김학문, 1994; 김홍택, 2001; 이송 등, 2006).

필자들은 배면부지가 아주 협소한 도심지 굴착 현장에서도 적용이 가능한 새로운 흙막이 공법의 개발을 목표로 연구를 진행 중이다 (김영석 등, 2009). 현재 개발 중인 흙막이 공법은 심층혼합처리 공법의 교반혼합기술을 응용한 공법으로 교반혼합체의 직경을 확대하여 교반혼합체와 주변지반의 마찰력을 극

대화하는 방법이다. 교반혼합체의 큰 직경 (보통 300-500mm)으로 보강체의 근입깊이를 상대적으로 짧게 할 수 있으며, 보강체의 수량도 대폭 줄일 수 있다는 장점을 가지고 있다. 본 논문에서는 범용프로그램인 Plaxis를 이용하여 교반혼합체로 보강된 흙막이 벽체의 전반적인 거동을 검토하였다.

## 2. 대구경 교반혼합체 공법의 특징

대구경 교반혼합체 공법은 기존의 쏘일네일링 공법과 유사한 흙막이 지보 공법이지만, 기존의 쏘일네일링 공법이 천공직경이 약 100mm 정도인데 비해, 본 공법은 직경 300-500mm의 대구경 시멘트 교반혼합체(쏘일시멘트)를 지반내에 일정한 각도로 타설한다. 이러한 대구경 교반혼합체의 적용으로 지반과 개량체의 마찰저항을 극대화 할 수 있어, 굴착에 따른 벽체의 변형을 억제 시킬 수 있다 (e.g., 財團法人日本先端建設技術センター, 1997). 또한, 축조 구경이 크기 때문에 기존의 앵커 또는 네일링 공법에 비해 지반 속 타설 깊이를 매우 짧게 할 수 있다. 그리고 타공법에 비해 상대적으로 보강체의 개수도 줄일 수 있다는 특징이 있다 (삼성물산(주) 건설부문과 한국건설기술연구원, 2008). 교반혼합체 중심에는 인장용 재료로서 철근 또는 부식의 영향이 적은 FRP 룯드가 설치되어 있고, 룯드의 주위에는 압축강도가 높은 시멘트 밀크를 주입하여, 룯드, 시멘트 밀크, 쏘일시멘트의 3층 구조로 하여 룯드의 부착력을 확보할 수 있도록 하였다.

## 3. 수치해석을 이용한 대구경 교반혼합체 공법의 거동 분석

### 3.1 수치해석 조건

대구경 교반혼합체로 보강된 흙막이 벽체의 변형을 검토하기 위하여 유한요소 해석에 의한 수치해석을 실시함으로써 다양한 조건에 따른 배면지반의 변형을 검토하였다. 수치해석은 범용프로그램인 Plaxis 8.2를 이용하였으며, 2차원 평면 변형률 (plane strain) 조건으로 해석하였다.

그림 1은 수치해석 모델을 나타내고 있으며, 각 요소는 15-node 삼각형 요소로 해석하였다 (참고문헌 1의 현장조건을 재현한 수치해석 수행). 본 연구에서는 각 굴착 단계별로 굴착 및 대구경 교반혼합체 설치를 반복적으로 수행하는 것으로 해석하였다.

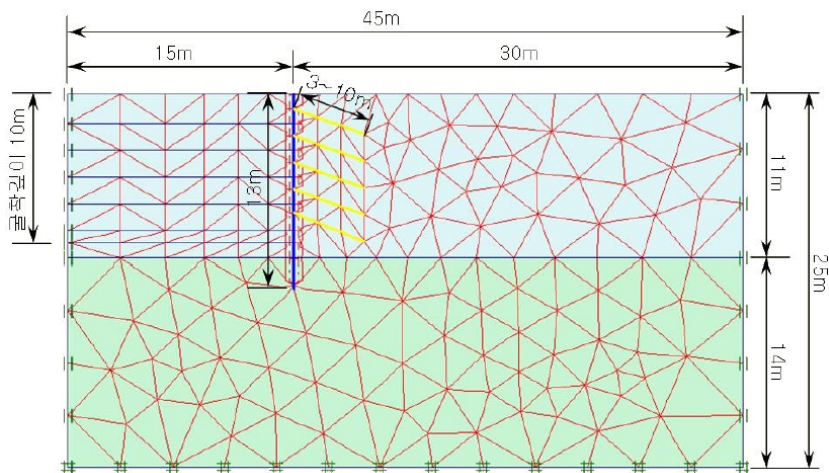


그림 1. 수치해석 mesh

모델은 교반혼합체의 길이를 3-10m로 변화시켜 해석을 실시하였으며, 교반혼합체의 길이에 따라 모델 경계면에서의 영향이 나타나지 않도록 벽체로부터 배면지반 30m까지 모델링 하였다. 전체 모델 심도는 25m로 하였으며, 그중 상부 11m는 상부층, 하부 14m는 하부층으로 구분을 하였다. 굴착폭도 경계면의 영향을 최소화하기 위하여 15m로 하였다. 모델지반의 변형에 대한 경계조건은 모델 저면의 수직 및 수평변위와 측면의 수평 변위를 고정시켰다. 한편, 수치해석에서 지반은 탄소성체로 가정하여 Mohr-Coulomb의 파괴기준을 적용시켰으며, 교반혼합체와 흙막이 벽체인 S.C.W에 대한 모델링에 있어서는 탄성체로 가정하여 수행하였다. 또한 굴착깊이는 지표로부터 10m로 하였으며, 교반혼합체 설치를 위해 교반혼합체의 심도보다 1m 하단까지 굴착을 실시한 후 교반혼합체를 설치하는 순서로 해석을 실시하였다.

### 3.2 수치해석에 사용한 물성치 (지반 및 보강재)

지반은 상부지반과 하부지반으로 나누어 상부 11m까지를 상부지반 그 이하를 하부지반으로 하였다. 상부지반은 교반혼합체가 설치되고 굴착에 의해 변형이 발생하는 지반으로써 해석 case에 따라 점착력이 있는 경우와 점착력이 없는 경우로 나누어서 해석을 수행하였다. 여기서 점착력이 있는 경우는 실트질 점토가 혼재되어 있는 것으로 가정하여 점착력 20 kPa을 적용하였다. 또한 교반혼합체는 심재인 철근과 주변부 콘크리트가 일체 거동을 하는 합성부재로 가정하여 grid 요소로 해석을 수행하였다. 또한, 지반과 교반혼합체 사이의 조인트 요소는 고려하지 않았다. 벽체는 S.C.W를 plate 요소로 해석을 수행하였다. 이때 S.C.W는 H-pile 강재와 Soil cement의 합성부재를 고려하여 해석하였다.

표 1은 상부지반과 하부지반의 물성치를 나타내고 있으며, 표 2는 교반혼합체와 벽체의 물성치를 나타내고 있다. 여기서 교반혼합체의 EA값은 해석 case에 따라 교반혼합체의 단면적(A)이 변화하므로 단면적에 따라 EA값이 변화하는 것으로 해석을 실시하였다.

표 1. 지반의 물성치

물성치 지반구분	단위중량 (kN/m <sup>3</sup> )	내부마찰각 (°)	점착력 (kPa)	탄성계수 (MPa)	포아송비
상부지반	18	38	0 (점착력 無) 20 (점착력 有)	10	0.2
하부지반	19	38	20	300	0.3

표 2. 보강재 및 벽체의 물성치

	EA (kN/m)	EI (kNm <sup>2</sup> /m)	단위중량 (kN/m/m)	포아송비	기 타
S.C.W	2.43E6	44600.00	0.65	0.3	
교반혼합체	154,331.67 ~ 479,310				교반혼합체의 단면적, 간격에 따라 변화

## 4. 수치해석 결과

### 4.1 교반혼합체의 길이 영향

그림 2는 교반혼합체의 길이에 따른 벽체의 최대 수평변위를 나타내고 있다. 교반혼합체의 길이가 길어짐에 따라 최대 수평변위는 작아지고 있으며, 지반의 점착력이 없는 경우는 교반혼합체의 길이가 짧을 경우 (5m 미만) 수평변위가 현저하게 증가하고 있다. 이와 같이 교반혼합체의 길이가 짧을 때는 지반

의 점착력의 유무에 따라 큰 차이를 나타내고 있으며, 교반혼합체의 길이가 길어지면 점착력의 유무와 관계없이 비슷한 경향을 보이고 있다. 전반적인 경향은 점착력의 유무와 관계없이 교반혼합체의 길이가 길어짐에 따라 벽체의 변위는 감소하고 있다. 이는 대구경 교반혼합체 공법의 경우 교반혼합체로 보강된 영역이 보강토 옹벽과 같은 작용을 하는 것으로, 교반혼합체의 길이에 따라 보강영역의 길이가 길어지므로 유사 옹벽의 크기가 커지는 효과라고 판단된다.

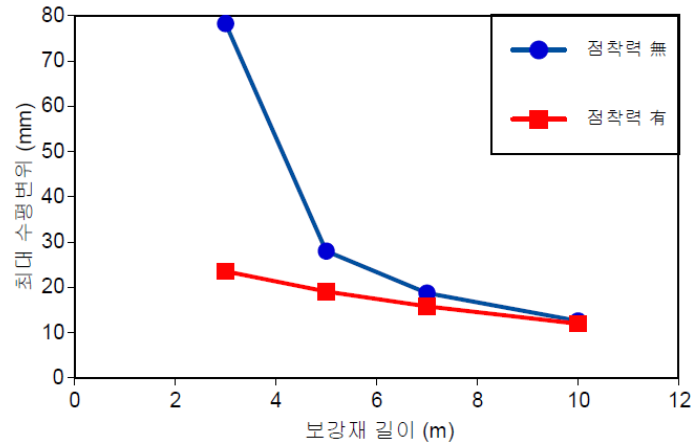


그림 2. 교반혼합체의 길이와 벽체의 수평변위와의 관계

그림 3은 각 교반혼합체의 길이에 따라 보강영역의 변형 거동을 나타내고 있다. 교반혼합체로 보강되어 있는 부분이 일정량의 토괴 (유사 옹벽)와 같은 거동을 보이고 있다. 배면지반의 침하 거동도 교반혼합체로 보강된 부분의 침하에 비해 보강영역을 조금 지난 부분에서 가장 큰 침하량을 나타내고 있다. 이와 같이 배면지반의 수평거동, 침하거동으로 판단 결과 교반혼합체로 보강된 영역은 유사 옹벽과 비슷한 거동을 보이고 있는 것을 알 수 있다.

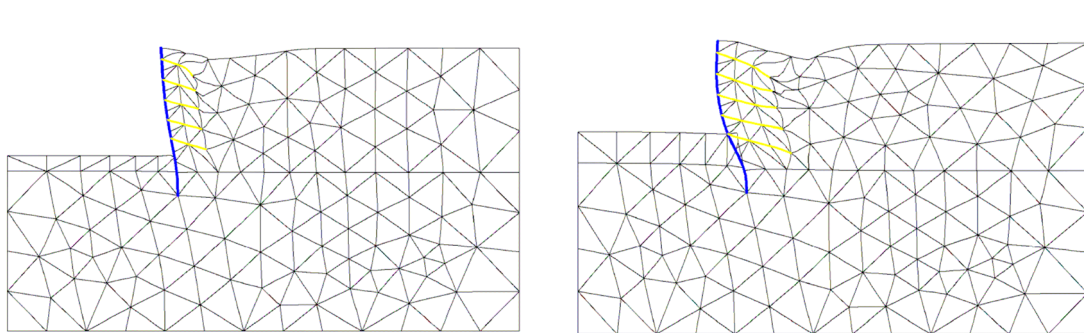


그림 3. 보강영역에 따른 배면 지반의 변형 거동

#### 4.2 교반혼합체의 직경 영향

그림 4는 교반혼합체의 직경과 벽체의 수평변위와의 관계를 나타내고 있다. 교반혼합체의 직경이 커짐에 따라 벽체의 변형은 작게 나타나고 있다. 그러나 교반혼합체의 길이와 벽체와의 관계와 같이 교반혼합체의 직경은 벽체의 변위에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 이는 수치 해석에서는 교반혼합체와 주변 지반과의 마찰력에 의한 변형 거동이 나타나는 것이 아니라 단순히 교반혼합체의 직경이 커짐에 따라 교반혼합체의 강성이 커지는 것으로 모델링이 되었기 때문인 것으로 판단된다. 향후 보다 정확한 직경과 벽체변형과의 관계를 파악하기 위해서는 교반혼합체를 grid 요소가 아닌 solid 요소로 해석을 실시하여 보강재의 직경이 커짐에 따라 교반혼합체와 주변 지반과의 마찰면적이 커지는 것으로 해

석을 실시하여 비교해 볼 필요가 있을 것으로 판단된다. 또한, 점착력의 유무에 따라 벽체의 변형량에 차이가 매우 크게 나타난 것을 알 수 있다.

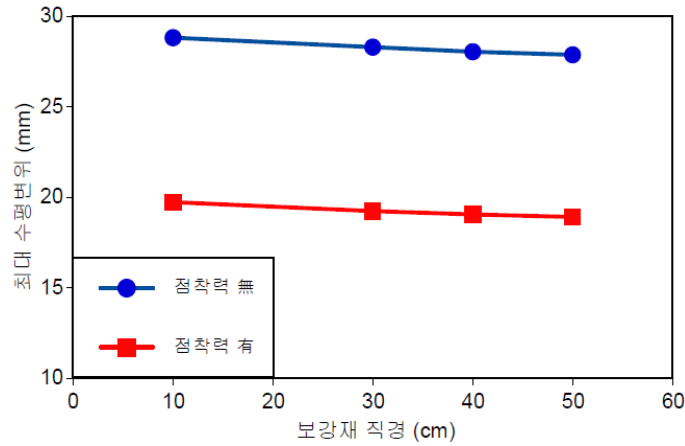


그림 4. 교반혼합체의 직경과 벽체의 수평변위와의 관계

### 4.3 교반혼합체의 설치각도 영향

그림 5는 교반혼합체의 설치 각도와 벽체의 수평변위와의 관계를 나타내고 있다. 점착력이 없는 지반의 경우는 교반혼합체의 설치각도가 커짐에 따라 벽체의 수평변위는 작아지고 있으나 설치각도가 25°를 넘으면 더 이상의 수평변위의 감소는 나타나지 않았다. 또한 설치각도가 30°에서는 25°에서보다 약간 큰 수평변위를 나타내고 있다. 따라서 교반혼합체의 설치각도는 점착력이 없는 모래지반에서는 설치각도에 따라 벽체의 수평변위가 최소가 되는 한계 설치각도가 존재할 것으로 판단된다. 이와 같은 설치각도의 한계값은 지반의 내부마찰각과 밀접한 관계가 있을 것으로 판단된다. 그러므로 배면지반의 내부마찰각을 변화시키면서 교반혼합체의 설치 각도를 바꾸어 보다 많은 case의 수치해석을 실시하면 한계 설치각도와 배면지반의 내부마찰각과의 관계를 파악할 수 있을 것으로 판단된다. 한편, 점착력이 있는 지반의 경우는 교반혼합체의 설치각도가 커짐에 따라 약간의 수평변위의 감소는 보이고 있으나, 변형량에 대해서는 큰 차이가 나타나지 않았다.

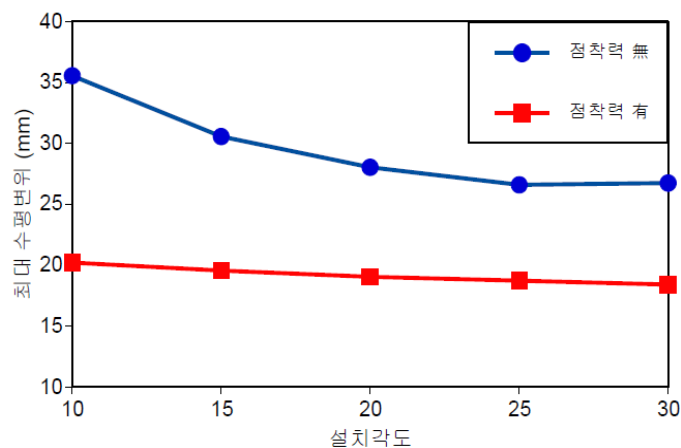


그림 5. 교반혼합체 설치각도와 벽체의 수평변위와의 관계

#### 4.4 교반혼합체의 연직간격 영향

그림 6은 교반혼합체의 연직방향 간격과 벽체의 최대 수평변위와의 관계를 나타내고 있다. 교반혼합체의 연직 간격이 커지게 되면 벽체의 수평변위가 증가하는 것으로 나타났다. 이는 교반혼합체의 연직 간격이 커지면 보강 영역의 개량이 작아지기 때문에 변형이 더 커지는 것으로 판단된다. 그러나, 지반의 점착력의 유무에 따른 벽체의 변형량은 차이가 있었으나 변형 거동의 차이는 나타나지 않았다.

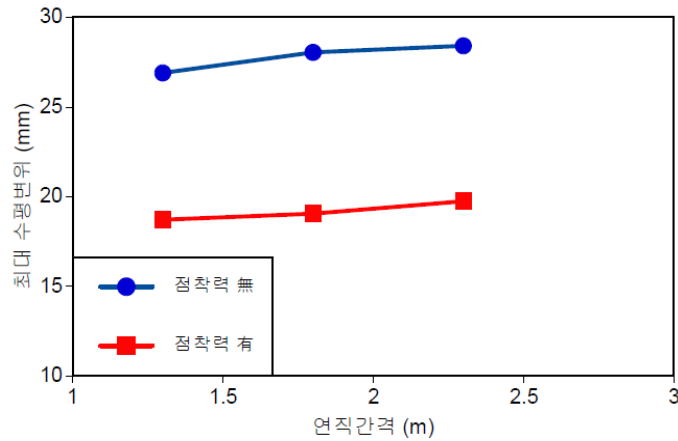


그림 6. 교반혼합체의 연직간격과 벽체의 수평변위와의 관계

#### 4.5 교반혼합체의 수평간격 영향

그림 7은 교반혼합체의 수평간격과 벽체의 수평변위와의 관계를 나타내고 있다. 수평간격과 벽체의 변위와의 관계도 그림 6의 연직간격과 비슷한 경향을 나타내고 있다. 수평간격이 커지면 벽체의 수평변위도 증가하고 있으나 수평간격에 따라 변형량 자체는 큰 차이를 나타내고 있지 않다. 또한 지반의 점착력의 유무에 따라서도 변형량의 차이는 나타나고 있으나 변형거동의 경향은 두 경우 모두 비슷하게 나타나고 있다.

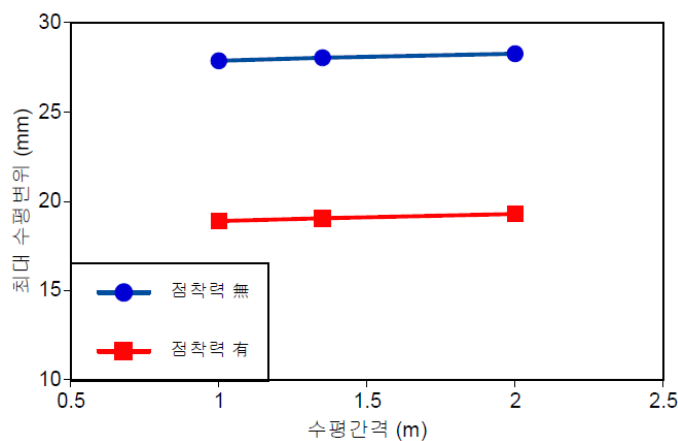


그림 7. 교반혼합체의 수평간격과 벽체의 수평변위와의 관계

## 5. 결론

본 논문에서는 수치해석을 통하여 교반혼합체로 보강된 흙막이 벽체의 거동을 평가하였다. 즉, 교반혼합체의 길이, 직경, 수평간격, 설치각도 등을 변화시켜 다양한 조건에서 거동을 검토하였다. 수치해석 결과를 요약하면 다음과 같다

- ① 교반혼합체의 길이와 벽체의 변위와의 관계는 교반혼합체의 길이가 증가하면 벽체의 최대 수평변위는 작아지고 있으며, 벽체의 변위는 지반의 점착력에 큰 영향을 받는다. 또한 점착력이 없는 지반에 대해서는 교반혼합체의 길이가 짧아지면 벽체의 변위가 급속하게 증가하는 구간이 존재한다.
- ② 대구경 교반혼합체로 보강된 흙막이 벽체의 경우 교반혼합체로 보강된 영역이 일체화 거동을 나타내고 있어 보강 영역이 보강토 옹벽과 같은 유사 옹벽 형태를 나타내고 있는 것으로 나타났다. 이는 쏘일네일링이 설치된 지반에서도 유사한 현상을 나타내고 있으며, 대구경 교반혼합체 공법의 경우 교반혼합체의 직경이 쏘일네일링에 비해 상당히 크기 때문에 쏘일네일링에서 보다 더 일체화 거동을 나타낸다.
- ③ 교반혼합체의 직경이 증가함에 따라 벽체의 변형은 작게 나타나고 있다. 이는 교반혼합체의 강성이 커짐으로써 보강 영역의 일체화 거동이 크게 나타나고, 개량 지반의 강성도 증가하기 때문이라고 판단된다. 또한 점착력의 유무에 따라서 벽체의 변형량에 차이가 매우 크게 나타났다.

## 참고문헌

1. 김영석, 조용상, 강인철, 김인섭 (2009), “교반혼합체 공법의 도심 흙막이 벽 적용”. *한국지반공학회 봄 학술발표회 논문집*, pp. 883-887
2. 김학문 (1994), “도심지 지하굴착의 문제점과 개선방향”, *한국지반공학회 가을학술발표회 Keynote Lecture*, pp. 158~166.
3. 김홍택 (2001), “쏘일네일링의 원리 및 지침”, 도서출판 평문각
4. 이송, 채점식, 김일, 우종택 (2006), “흙막이 구조물의 설계와 시공”, 도서출판 예문사
5. 삼성물산 주식회사 건설부문, 한국건설기술연구원 (2008), “Radish Anchor 공법의 국내적용연구”
6. 財團法人 日本先端建設技術センター (1997), “Radish Anchor 工法” (일본어)