

# 지반개량(SI)앵커의 인발거동특성

Characteristics of Pullout Behavior of Soil Improvement(SI) Anchor

임	중	철* <sup>1</sup>	홍	석	우* <sup>2</sup>
Im,	Jong -	Chul	Hong,	Seok -	Woo
송	무	효* <sup>3</sup>	강	낙	안* <sup>4</sup>
Song,	Mu -	Hyo	Kang,	Nak -	An

## Abstract

SI anchor means the soil improvement anchor. The ground for supporting anchor is improved by JSP, and as a result, SI anchor body has about 80cm in diameter. SI anchor shows high pullout resistance by the frictional force between anchor body and ground, and the bearing capacity of anchor body. Especially the frictional force increases very much with increasing diameter of anchor body improved by JSP.

In this study, model and field tests are made to analyse the mechanism of pullout resistance of SI anchor. Through model tests for the SI anchor in air dried sandy ground, strain fields of ground around SI anchor surface are analysed by a photo analysis method using the latex membrane on the wall of soil tank.

The results of field tests are analysed by the strains measured by 10 strain gages attached on the inner wall of specially designed PVC pipe embedded in anchor body, and the strains of anchor body are also measured in the model tests.

## 요 지

SI 앵커는 지반개량 앵커를 의미한다. 이는 앵커를 지지하는 지반을 JSP로 개량한 것으로, SI 앵커체는 80cm 정도의 직경을 가지게 된다. SI 앵커는 앵커체와 지반사이의 마찰저항력과 앵커체 앞면의 지압저항력으로 인해 높은 인발저항력을 발휘하게 되는데, 특히 마찰저항력은 JSP로 개량된 앵커체의 직경의 증대로 인해 상당히 증가하게 된다.

본 연구에서는 SI 앵커의 인발저항기구를 분석하기 위해 실내 모형실험과 현장실험을 실시하였다. 공기전조 모래지반 내에서의 실내 모형실험을 통해 SI 앵커 주변지반의 변형특성을 분석하였는

- 
- \*1 정회원, 부산대학교 공과대학 토목공학과 부교수
  - \*2 정회원, 부산대학교 공과대학 박사수료, 생산기술연구소 특별연구원
  - \*3 정회원, 동의대학교 공과대학 토목공학과 교수
  - \*4 정회원, 도립 거창전문대학 토목과 전임강사

데, 이는 토조 벽면에 설치된 라텍스 멤브레인을 이용한 사진 분석법을 통해 이루어 졌다.

10매의 변형률게이지가 부착된 특수 설계된 PVC 파이프를 앵커체 내에 설치하고 변형률을 측정하여 현장실험의 결과를 분석하였는데, 역시 실내 모형실험과 같이 앵커체 내에서의 변형률을 측정하였다.

Keywords : Bearing, resistance, Frictional resistance, Pullout resistance, Frictional stresses, Strain fields

## 1. 서 론

지반 굴착시 토괴의 붕괴를 방지하고 소요의 저항력을 발휘할 수 있도록 지반을 보강하는 공법 중에서도 앵커는 많은 장점 때문에 그 사용이 국내외적으로 증가되고 있다.

그런데 토사나 점토와 같은 낮은 강도의 지반에서의 시공시, 앵커체 표면의 주면마찰저항력이 낮아 높은 인발력을 요구하는 현장여건에서는 사실상 앵커를 설계에 적용하기가 어려웠다. 그러나 삼성 중공업(조선소)의 드라이 도크(Dry dock) 증설 현장의 연약지반에 처음으로 지반개량앵커(SI 앵커)가 개발되어 시공되었고(林鍾鐵 등, 1992a ; 韓國地盤工學會, 1997

; 洪碩佑 등, 1992 ; 洪碩佑, 1994), 이후로 여러 채널을 통해 소개되어 각종 흙막이 현장에서 적용되고 있으나 아직 이론적으로 확립되지 않고 설계·시공되고 있는 실정이다. SI 앵커는 앵커체가 지지될 지반을 JSP로 개량한 후 그 내부에 앵커를 타설하는 공법으로 개량된 앵커체의 직경이 80cm 정도로 크기 때문에 앵커체 앞면에서는 지압저항이 발생한다. 그래서 전체 인발저항력은 지압저항과 마찰저항의 합으로 나타낼 수 있는데, 이는 일반 마찰방식 앵커와는 다른 점이다. 그런데 이 지압저항으로 인해 앵커체의 주변지반은 일반마찰방식 앵커와 다른 거동을 하게 된다. 그림 1은 SI 앵커의 구조와 인발저항기구를 나타낸다.

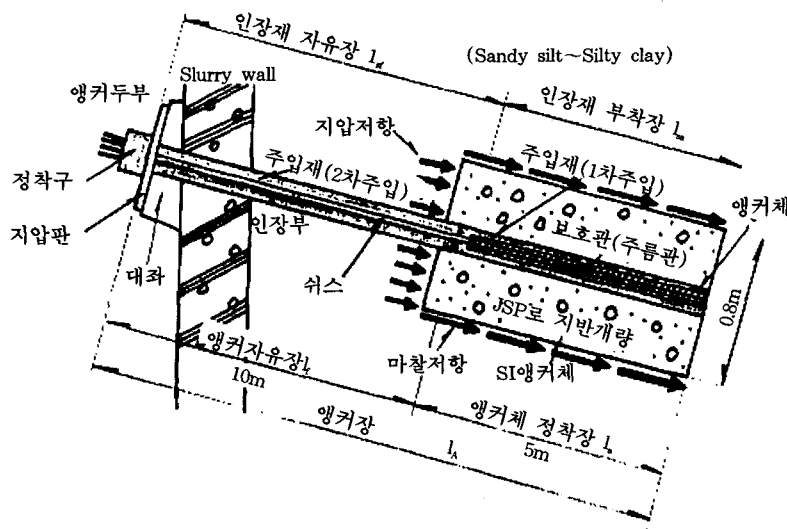


그림 1. SI 앵커의 구조 및 인발저항 기구

본 연구에서는 SI 앵커를 모델로 한 강체의 모형 경사앵커를 제작하여 실내모형실험을 수행하였으며, 일반적인 지반앵커의 경우와 인발에 따른 파괴형식을 비교하였다. 또한 현장실험을 통해 실내모형실험의 결과와 비교하였다.

그 결과, SI 앵커는 같은 직경의 일반 마찰방식 앵커와 비교하여 월등히 높은 인발력을 발휘하였으며, 앵커체 주변지반의 거동도 매우 다르게 나타났다. 본 논문에서는 토사지반에 타설된 SI 앵커의 극한인발력의 산정식과 지압저항의 적용방법을 제안하고자 한다.

## 2. 모형지반의 변형해석법

모형실험의 결과를 분석하기 위해서는 지반의 변형과 파괴면의 발달과정을 관찰해야 한다(林鍾鐵 등, 1992b). 변형은 변형률, 변위 등으로 나타내는데, 파괴면은 정의대로 변위의 불연속면(Frydman 등, 1976)이라는 개념을 사용하면, 실제로 그 면을 찾기가 매우 어렵기 때문에 파괴면을 찾는 데 사용되는 실용적인 방법인 최대전단변형률( $\gamma_{max} = \epsilon_1 - \epsilon_3$ )의 집중면(Baker, 1980)이라는 개념을 많이 사용하게 된다. 본 논문에서는 사진법을 이용해서 지반의 변형을 해석하는 방법을 적용하였으며, 사진법에 대한 개요는 다음과 같다.

평면변형률 모형토조에서 중간주변형률( $\epsilon_2$ )이 작용하는 면을 투명한 아크릴 판으로 구속하고 아크릴 판과 지반의 사이에는 마찰을 적게 하기 위해서와, 지반의 변형을 관찰하기 위해서 얇은 라텍스 멤브레인(0.2mm)을 0.1mm 정도의 그리이스층을 사용해서 부착한다. 멤브레인에는 격자형으로 선을 그려 지반의 유한요소를 나타내게 하고, 아크릴판 위에는 두 개의 부동점을 설치한다. 이 유한요소들을 단계별로 사진촬영해서, 그 좌표를 컴퓨터 프로그램 등으로 읽는다. 그리고 두 사진상의 부동점의 좌표를 동일하게 해서 좌표변환하여 비교하면, 변형 전후의 지반요소의 절점변위가 구해진다. 이 절점(사각형 요소일 경우는 4절점) 변위를

이용해서 요소의 변형률(또는 변형률중분)의 크기와 방향을 구할 수 있게 되며, 지반해석시 잘 이용되는 동축성(co-axiality) 가정( $\sigma$ 방향 =  $d\epsilon_1$  방향)을 이용하면 응력의 크기와 방향도 구할 수 있다.

한편, 지반변형의 관찰을 위하여 Takagi 등(1983)은 X-ray촬영법을, Andraxes와 Butterfield 등(1970)은 스테레오 사진법을 이용했는데, 이 방법들은 지반내의 표적 설치에 많은 시간과 노력이 들고 촬영이 번거로워 사용에 어려움이 있고, 지반요소의 형상에 대한 결점도 있다(林鍾鐵 등, 1992b).

본 연구에서는 라텍스 멤브레인을 지반표적으로 사용함으로써 표적 설치에 시간과 노력이 크게 절약되고, 표적의 개수에도 제한이 없으며, 또한 일반 사진기를 사용함으로써 특별한 기술 없이도 지반변형의 관찰이 가능하도록 했다. 또한, 변형률 해석에는 4절점 등매개변수 요소를 사용하여 일반성을 높였다.

## 3. 실내모형실험

### 3.1 실험장치

SI 앵커의 인발저항력을 알기 위한 실내모형 인발실험장치의 개요도는 그림 2 와 같다. 실험장치에 대한 자세한 내용은 金相允 등(1993), 洪碩佑 등(1993,1994)에 발표된 내용 참조.

모형토조는 그 크기가 800mm×3000mm×1500mm인 2차원 평면변형률 토조이다. 한쪽 측면은 지반변형의 관찰을 위해 투명한 아크릴 판으로 제작되었다. 앵커체의 인발장치는 유압식 재하장치, 롤러, 체인등을 이용해서 제작했다. (그림 2 참조)

깊은 지반 속의 앵커를 근사하기 위해 상재압을 가하였는데, 상재압의 크기는 0.122kgf/cm<sup>2</sup> 이다.

모형지반에는 구포사가 사용되었으며, 공기 건조상태의 모래를 #10체(2mm)로 쳐서, 다

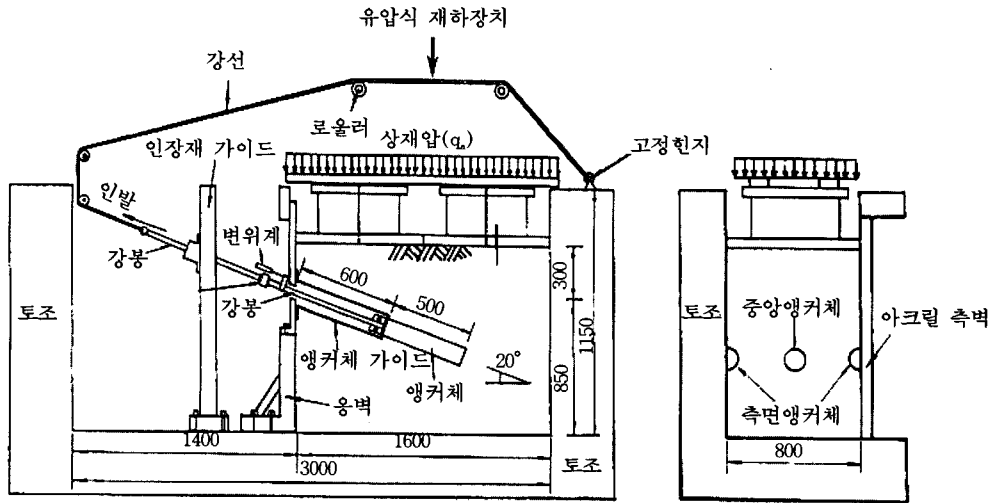


그림 2. SI 앵커의 실내모형실험 장치의 개요도, 단위 : mm

중체를 이용하여 공중낙하법(Air-Pluviated Method)에 의해 균질한 모래지반을 형성하도록 했다. 이 때의 모형지반 각 위치에서의 평균밀도는  $\gamma \approx 1.52 \text{ t/m}^3$  이다.

시험앵커체의 인발하중 측정을 위해 인장봉에 1방향 인장로드셀을 설치했다. 이 로드셀의 변형률계이지 배선방식은 4개이지법으로써, 휘트스톤 Full bridge 방식이라고도 하는데 이 방식은 출력이 많은 장점이 있다.

로드셀, 변형률계이지, 변위계 등으로 부터의 출력은 UCAM-10A를 사용하여 측정하였다.

### 3.2 실험방법

실험은 2가지 형태로 실시했는데, 먼저 그림 2 에서와 같이 가이드를 설치하여 지압저항을 받지 않고 마찰저항만을 받도록 하여 인발하

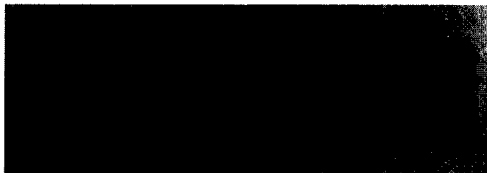


그림 3. 스트레인 게이지를 부착하고 리드선을 연결한 시험앵커체 내부

고, 또한 가이드를 제거하여 그림 4에서와 같이 지압저항과 마찰저항을 동시에 받도록 하여 인발했다.

그림 4의 CASE 1은 앵커체 내부에 설치한 변형률계이지로 앵커체의 마찰저항을 구하기 위한 실험의 형태를 나타내며, CASE 2는 세로 방향으로 앵커체를 절단한 것을 라텍스멤브레인이 붙어있는 투명한 토조의 측벽면에 부착하여 지압저항을 받는 경우와 받지 않는 경우를 나누어 지반의 변형을 관찰하기 위한 실험의 장치를 나타낸 것이다. 여기서, 벽면에 있는 반단면 앵커체는 지반거동 관찰에 사용되었고, 변형률계이지에 의한 마찰응력 측정은 중앙의 앵커체가 사용되었다. 토조의 측벽면에서의 앵커의 관찰은 2장에서 전술한 바와 같이 실시했다.

## 4. 실내모형실험 결과 및 고찰

### 4.1 하중 - 변위곡선

앵커의 인장용 강봉에 설치한 인장로드셀에서 측정된 하중을 이용하여 정리한 하중-변위 곡선은 그림 5와 같다. 이 그림에서 (가)곡선

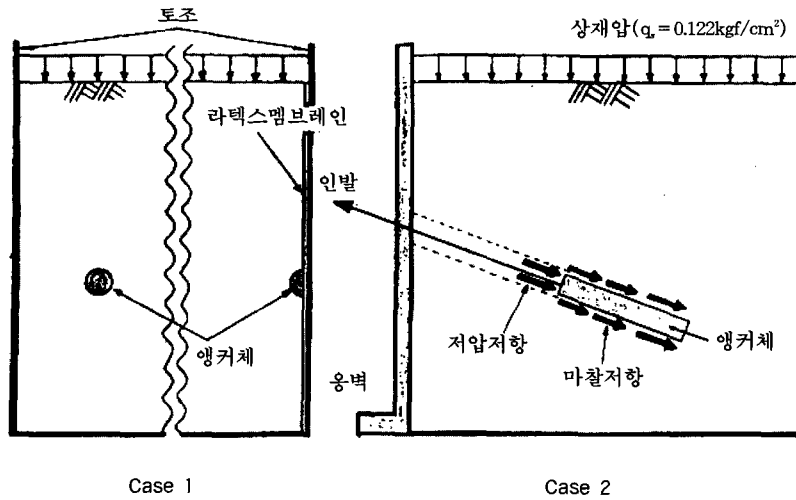


그림 4. SI 앵커 인발실험 방법, 단위:mm

은 가이드를 설치하여 마찰저항만을 받도록 하여(일반마찰방식 앵커의 근사) 실험한 결과이고, (나)곡선은 가이드를 제거하여 지압저항과 마찰저항을 동시에 받도록 하여(SI 앵커의 근사) 실험한 결과이다. (가)곡선에서는 로드셀 출력치 296.358kgf(변위  $\delta = 2.625\text{mm}$ )의 극한 인발력을 구했고, (나)곡선에서는 인발하중을 658.849kgf(변위  $\delta = 25.634\text{mm}$ )까지 증가시켰으나, 뚜렷한 극한인발력은 나타나지 않았고 지속적인 변형을 경화현상을 보였다. 그림 5에서 동일 인발력에 대해 지압저항이 발생하는 SI 앵커의 경우가 인발하중이 상당히 크고 급격한 파괴에도 이르지 않으며, 또한 변위도 억제되는 것을 알 수 있다.

#### 4.2 앵커체 각 측정점에서의 하중의 변화와 주면마찰응력의 분포

인발실험시 SI 앵커체 정착장의 각 측정점에 설치한 10개의 변형률게이지에서 출력된 인장변형률( $\epsilon$ )을 앵커의 변위( $\delta$ )에 따라 정리하여, 각 측정점에서 받는 하중과 마찰저항의 분포를 각각 식 (1), (2)를 이용하여 구했다(그림 6 참조).

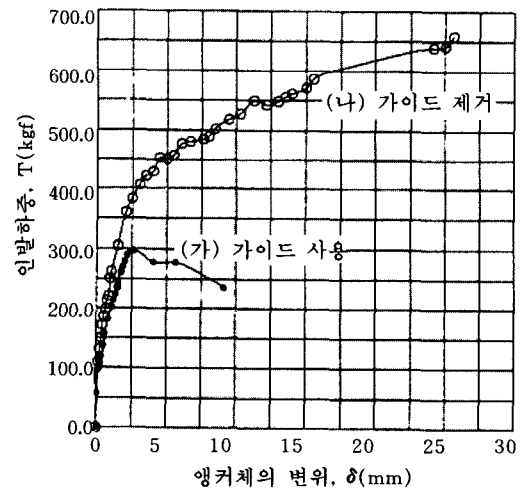


그림 5. 실내모형실험에서 인발에 따른 하중-변위 관계 곡선

그림 6에서 각 측정점에서 받는 하중  $T_i$ 는 식 (1)에서 구해진다.

$$T_i = \sigma_i \times A = E \times \epsilon_i \times A$$

$$T_{i+1} = \sigma_{i+1} \times A = E \times \epsilon_{i+1} \times A$$

$$\therefore T_i - T_{i+1} = \tau_i \cdot D \cdot \pi \cdot l_i \quad (1)$$

따라서 각 앵커체 구간의 평균 마찰응력  $\tau_i$ 는 식 (2)와 같이 된다.

$$\tau_i = \frac{T_i - T_{i+1}}{D \cdot \pi \cdot l_i} \quad (2)$$

여기서,

- $\epsilon_i, \epsilon_{i+1}$  :  $i$ 점 및  $i+1$ 점의 변형률(인장: +)
- $E$  : 앵커체 탄성계수( $3.71563 \times 10^4 \text{kgf/cm}^2$ )
- $A$  : 앵커체 강관 단면적 ( $15.403\text{cm}^2$ )
- $D, l_i$  : 각각 앵커체의 직경(9.3cm), 구간길이(5cm)

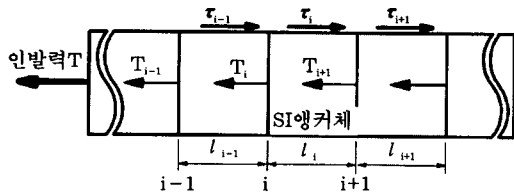


그림 6. 앵커체의 변형률을 이용한 마찰응력의 계산

그림 7은 식 (1), (2)를 이용해서 구한 SI 앵커체 각 위치에서의 하중분포와 주면마찰응력( $\tau$ )의 분포를 나타내고 있다. 그림 7을 주의해서 보면 변위가 증가함에 따라 앵커체의 길이방향으로 앞부분(0~20cm)의 마찰응력은 깊은부분 보다 상당히 높은 것을 알 수 있다. 이 현상은 金相允 등(1993)에 의한 일반앵커에 대한 결과(그림 9 참조)에서는 발생하지 않는 점으로 보아 SI 앵커의 특징인 것을 알 수 있다. Bendel(1965)에 의하면, 지압저항에 의한 지반의 거동은 그림 8과 같다고 하고 있다. 본 SI 앵커의 경우도 이와 유사한 지반거동을 일으켜 앵커체의 앞부분의 마찰응력이 증대하고 영향을 받지 않는 깊은부분은 원래의 주면마찰응력을 유지하고 있다고 생각할 수 있다(이 사실은 사진법을 이용한 지반거동분석을 통해 확인하였으며 자세한 내용은 4.4 절 참조). 그러나 이 모형실험의 경우는 벽체가 완전히 구속된 상태에서 지반밀도가 상당히 높은 상태에서의 출력값이므로 실제지반과는 조금 다를 것이다.

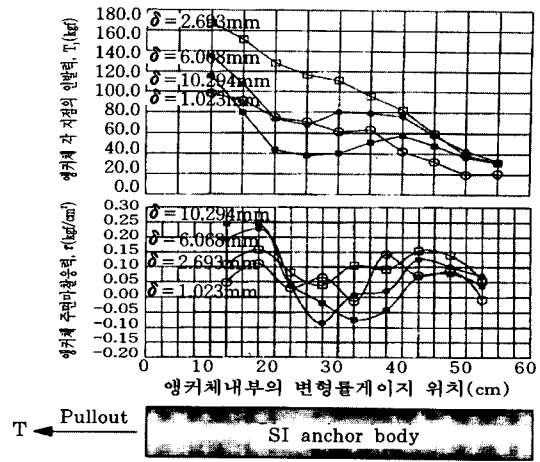


그림 7. SI 앵커체 각 위치에서의 하중분포와 주면마찰응력( $\tau$ )의 분포

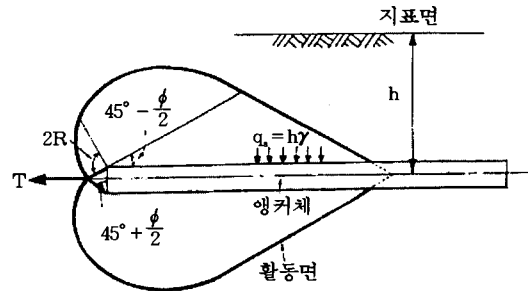


그림 8. 지압저항을 받는 앵커체 주변지반의 거동(Bendel, 1965)

### 4.3 앵커 인발에 따른 주변지반의 거동

앵커의 인발에 따른 주변지반의 거동은 2장에서 기술한 바와 같이 토조의 측벽에 부착된 멤브레인 위에 그려진 격자점의 움직임을 사진법을 이용해서 분석하여 관찰했다. 그림 9는 지반요소 사진법을 나타내고, 그림 10은 이 사진으로 분석한 초기 지반요소와 인발변위,  $\delta = 5\text{mm}$  이후의 지반요소의 변형된 모습을 나타낸다.

그림 11은 앵커체 변위  $\delta = 5\text{mm}$ (SI 앵커의 인발항복응력부근)일 때의 주변지반의 변위를 나타낸다. 이때 앵커체 앞면(A부분)의 지반의

변위를 보면 지압을 받는 면에서 썩기 모양의 파괴면이 생기는 것을 확인할 수 있다. 그리고 B부분의 지반변위는 그림에 점선 화살표로 표시한 바와 같이 상향으로 곡선을 그리며 이동하고 있는데 이는 전술한 그림 8의 내용과도 일치한다. 또한, 앵커체 상단(C부분)에서는 지반의 변위가 그다지 발생하지 않는 것을 볼 때 앵커의 인발시 파괴면이 표면에서 발생되는 것을 알 수 있다.

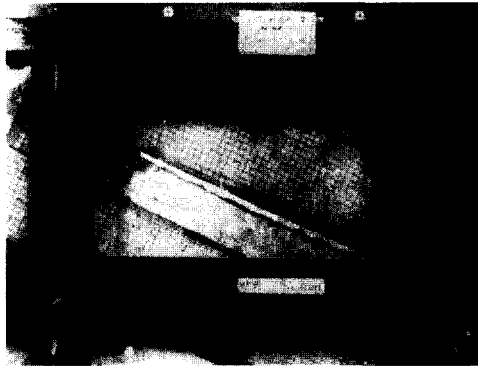


그림 9. 모형실험장치와 지반요소의 사진

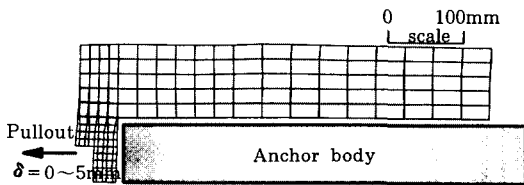


그림 10. 초기 지반요소와 인발변위 5mm이후의 변형된 지반요소 ( $\delta=0\sim 5\text{mm}$ )

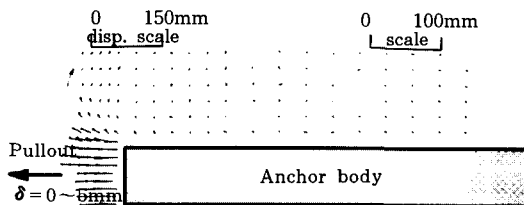


그림 11. SI 앵커의 인발시 주변지반의 변위( $\delta=0\sim 5\text{mm}$ )

그림 12는 주변지반의 최대·최소 주변형률 증분(principal strain increments)의 방향을, 그림 13은 무신축 방향(zero-extension direction)을 나타낸다. 주변형률증분의 방향은 이방성을 고려할 때의 중요한 정보가 되고, 무신축 방향은 파괴면의 방향을 아는데 중요한 역할을 한다. 그림 13에서는 썩기 모양의 파괴면이 생기는 것을 확인할 수 있었다. 그림 14는 전단변형률 등고선을 나타낸다. 여기서도 앵커체 상단부분에 변형률의 등고선이 발생하지 않는 것을 보아 앵커체 표면에서 파괴면이 발생한다는 것을 알 수 있다.

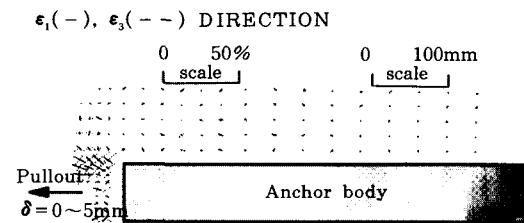


그림 12. SI 앵커의 인발에 따른 주변지반의 최대·최소 주변형률 증분 ( $\delta=0\sim 5\text{mm}$ )

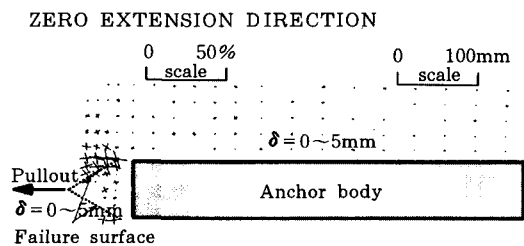


그림 13. SI 앵커 인발에 따른 주변지반의 무신축 방향 ( $\delta=0\sim 5\text{mm}$ )

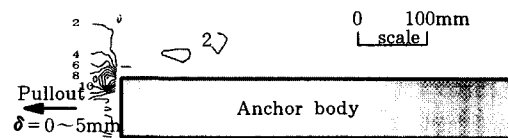


그림 14. SI 앵커의 인발에 따른 주변지반의 최대 전단 변형률 등고선 ( $\delta=0\sim 5\text{mm}$ )

## 5. SI 앵커 주면마찰응력 산정식 및 실험결과와의 비교분석

### 5.1 주면마찰응력 산정식 제안

앵커를 인발하면, 앵커체 표면에 마찰력이 작용하여, 앵커체 표면 부근의 지반요소에 작용하는 연직응력은 최대 주응력이 되지 않는다. 이러한 점을 고려해야 정도 높은 계산법이 제안될 수 있다(임종철, 1994). 그러나, 아직 이에 대한 충분한 연구가 진행되지 않았으므로 여기서는 연직 및 수평응력이 최초 정지상태를 그대로 유지해서 앵커의 인발 중에도 주응력을 유지한다고 가정해서 간략산정식을 제안했다.

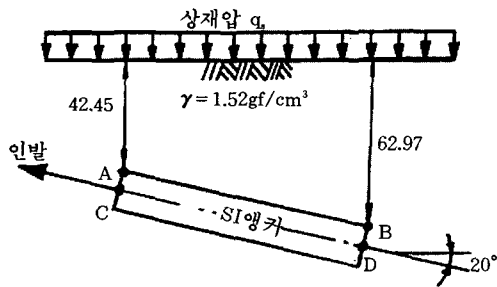


그림 15. 실내모형실험시의 앵커체 위치도, 단위:cm

그림 15 에서, A지점까지의 깊이를  $H_1$ , B지점까지의 깊이를  $H_2$ 라 하면,

계산순서 ①

$$\begin{cases} \text{A지점의 연직응력 } \sigma_{vA} = q_s + \gamma \times H_1 \\ \text{B지점의 연직응력 } \sigma_{vB} = q_s + \gamma \times H_2 \end{cases}$$

$\sigma_{vA}$ ,  $\sigma_{vB}$ 를 각각 A, B지점의 최대주응력( $\sigma_{1A}$ ,  $\sigma_{1B}$ )이라고 하면, 최소주응력은 각각 다음과 같다. 즉,  $\sigma_{3A} = K \cdot \sigma_{1A}$ ,  $\sigma_{3B} = K \cdot \sigma_{1B}$

여기서, K는 측압계수로서, 정지토압계수  $K_0$ 라고 가정하고 Jaky식 ( $K_0 = 1 - \sin \phi$ )을 이용하여 구하면 된다. 단, 이 식에서  $\phi$  값은 삼축 압축시험에 의해 구한 전단저항각을 말한다.

계산순서 ②

$$\begin{cases} \sigma_{3A} = K_0 (q_s + \gamma \times H_1) \\ \sigma_{3B} = K_0 (q_s + \gamma \times H_2) \end{cases}$$

또, A, B지점에서의 앵커체 표면의 수직응력  $\sigma_{nA}$ ,  $\sigma_{nB}$ 는 다음과 같다.

계산순서 ③

$$\begin{cases} \sigma_{nA} = \frac{\sigma_{1A} + \sigma_{3A}}{2} + \frac{\sigma_{1A} - \sigma_{3A}}{2} \cos(2\theta) \\ \sigma_{nB} = \frac{\sigma_{1B} + \sigma_{3B}}{2} + \frac{\sigma_{1B} - \sigma_{3B}}{2} \cos(2\theta) \end{cases}$$

C, D지점의 수직응력은 다음과 같다.

계산순서 ④

$$\begin{cases} \sigma_{nC} = K_0 \times \sigma_{nA} \\ \sigma_{nD} = K_0 \times \sigma_{nB} \end{cases}$$

AC단면 및 BD단면에서의 앵커체 표면에 작용하는 수직응력의 분포는 타원형이므로, 앵커체 원주의 평균 수직응력은 다음과 같이 구할 수 있다.

계산순서 ⑤

$$\begin{cases} \sigma_{AC} = \frac{\pi}{4} \{ (D + \sigma_{nC} \times 2)(D + \sigma_{nA} \times 2) - D^2 \} / (\pi \times D) \\ \sigma_{BD} = \frac{\pi}{4} \{ (D + \sigma_{nD} \times 2)(D + \sigma_{nB} \times 2) - D^2 \} / (\pi \times D) \end{cases}$$

$\therefore$  AC 및 BD단면에서의 평균주면마찰저항은 다음과 같다.

계산순서 ⑥

$$\begin{cases} \tau_{uAC} = \sigma_{AC} \times \tan \mu \\ \tau_{uBD} = \sigma_{BD} \times \tan \mu \end{cases}$$

여기서, 林鍾鐵(1989)에 의하면,  $\mu$ 는 앵커체 표면의 마찰각으로, 앵커체 표면에서 剪斷面이 발생할 때는 표면 방향이 무신축방향(zero-extension direction)이 된다.

### 5.2 실험결과와의 비교분석

평면변형을 압축시험에 의한 내부 마찰각( $\phi_{psc}$ ), 평면변형을 압축시험에서의 무신축방향(zero-extension direction)의 면 위에서의 전단저항각( $\phi_{ze}$ ), 직접전단시험에 의한 파괴면 위의 전단저항각( $\phi_{ds}$ ) 및 삼축시험에 의한 내부마찰각( $\phi_w$ )의 관계는 일반적으로 식 (3)과 같은 관계를 갖는다.



$$\phi_{psc} > \phi_{ze} = \phi_{ds} \approx \phi_{lc} \quad (3)$$

$\uparrow$              $\uparrow$   
 (이론 및 실험적 관계) (실험적 관계)

$\mu = \phi_{ze}$ 의 관계에서, 무신축방향의 전단저항

각은 파괴면과 무신축방향이 동일한 시험인 직접전단시험에 의해 구한  $\phi_{ds}$ 와 같다. 그래서  $\mu = \phi_{ds} = 38.8^\circ$ 를 대입하여 실내모형실험 결과를 5.2 절의 주면마찰응력 산정식에 대입하여 계산순서에 따라 정리하면 표 1 과 같다.

표 1. SI 앵커체의 평균주면마찰저항력의 산정

①	최대주응력	$\sigma_{vA} = \sigma_{1A}$	0.187(kgf/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_{vB} = \sigma_{1B}$	0.218(kgf/cm <sup>2</sup> )
②	최소주응력	$\sigma_{3A}$	0.070(kgf/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_{3B}$	0.081(kgf/cm <sup>2</sup> )
③	상면수직응력	$\sigma_{nA}$	0.173(kgf/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_{nB}$	0.202(kgf/cm <sup>2</sup> )
④	측면수직응력	$\sigma_{nC}$	0.057(kgf/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_{nD}$	0.066(kgf/cm <sup>2</sup> )
⑤	평균수직응력	$\sigma_{AC}$	0.116(kgf/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_{BD}$	0.135(kgf/cm <sup>2</sup> )
⑥	평균주면마찰저항	$\tau_{uAC}$	0.093(kgf/cm <sup>2</sup> )	$\tau_{uBD}$	0.109(kgf/cm <sup>2</sup> )

표 1에서 구해진 값은 그림 7의 SI 앵커의 실측치와 거의 비슷하다. 그림 16은 마찰저항의 실측치와 계산치를 비교한 것인데, 거의 비슷한 값이 나오는 것을 알 수 있다. 측압계수를 정지토압계수가 아닌 적절한 값을 대입하면, 보다 실측에 가까운 값을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

## 6. 현장실험과의 비교

### 6.1 현장실험시 상황

실험에 사용된 SI 앵커는 앵커체 정착장

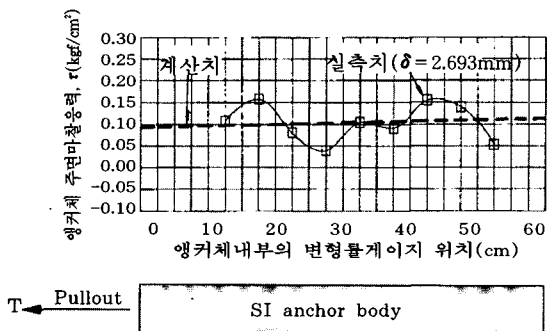


그림 16. 실내모형실험에서 측정된 실측치와 계산치의 비교

5m, 자유장 10m이다. 앵커체 내부에는 변형률 게이지를 부착한 20cm 길이의 PVC파이프 11개를 게이지 간격이 50cm되도록 연결 설치해서 앵커의 인발에 따른 앵커체의 변형률을 측정할 계획이었으나, 깊은 쪽 5개를 현장 장비가 절단해 버려서 얇은 쪽 5개만이 사용되었다. (현장실험 및 실험결과에 관한 자세한 내용은 임중철 등(1992a,1996), 홍석우 등(1992,1994) 참조). 이때 앵커체 정착지반은 N치가 15정도인 풍화토(ML)이다.

### 6.2 현장실험 결과 및 적용성 고찰

#### 6.2.1 하중-변위 곡선

앵커두부에 설치된 로드셀에서 측정된 인발 하중을 토대로 하중-변위 곡선을 그리면 그림 17과 같다. 시험시 인발하중은 94.74tf까지 증가시켰으나, 극한인발력에는 도달하지 않고 약간의 항복 경향을 보였다. 더 이상 하중을 가해서 완전한 인발시까지 시험을 계속하는 것이 바람직하지만, 센터홀 잭의 스트로크 부족으로 인해서 94.74tf의 하중단계에서 시험을 종료하였다.

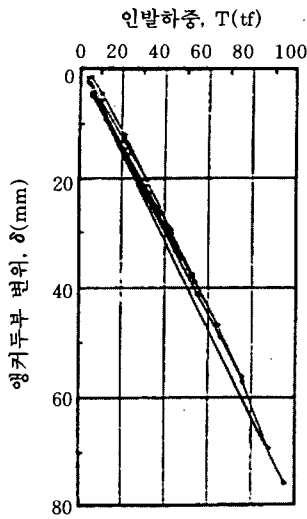


그림 17. 앵커의 인발에 따른 하중-변위 곡선

### 6.2.2 앵커의 인발에 따른 앵커체 주면마찰 응력 분포

앵커체 정착장의 각 위치에서 측정된 인장 변형률( $\epsilon$ )과 식 (2)를 이용해서 앵커체 길이 방향의 주면마찰응력( $\tau$ )의 분포를 구하면 그림 18과 같다. 이 그림에서 파선으로 표시된 계산치는 6.3 절에서 구해진 값이다.

이 그림에서 값은 앵커의 인발에 따라 극한 값( $\tau_u$ ) 1.5kgf/cm<sup>2</sup> 전후, 잔류값( $\tau_r$ ) 0.35kgf/cm<sup>2</sup> 전후의 값을 취하고 있어, 앵커체 깊이 방향으로 명확한 진행성 파괴가 발생하고 있다는 것을 알 수 있다.

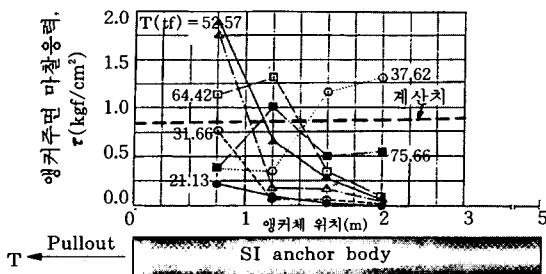


그림 18. 앵커체 각 위치에서의 주면마찰응력( $\tau$ )과 계산에 의한 주면마찰응력의 분포

### 6.2.3 실험결과와 고찰 및 진행성의 평가

본 시험앵커의 경우는 앵커체 정착장이 2.5m 인 짧은 구간에 대해서만 측정했으며, 또 앵커체 직경도 일반 앵커보다는 커서 강성이 강한 데도 앵커체의 인장에 따른 진행성 파괴가 뚜렷이 나타나고 있다.

이 진행성 파괴의 영향을 고려하지 않고, 극한주면마찰응력( $\tau_u$ )이 앵커체 전구간에 동일하게 작용한다고 가정하면 극한인발력 평가시, 과대평가를 초래할 수 있다. 일반적으로 사용되는 안전율 2.5정도로써 어느 정도 불안요인이 무마되었다고 생각할 수 있으나, 앞으로는 보다 명확한 해석을 통해 안정성을 높이고, 불필요한 경제적 손실도 방지할 필요가 있다.

여러가지 결점이 있지만 그 간편성 때문에 지반앵커의 극한인발력을 산정하는데 잘 사용되고 있는 韓國地盤工學會(1997)의 표에 의하면 N치가 15정도인 사력 또는 모래지반의 경우의 극한주면마찰응력  $\tau_u \approx 1.5\text{kgf/cm}^2$ 인데, 이 값은 그림 18의 최대치와 비슷하다. 여기서,  $\tau_u = 1.5\text{kgf/cm}^2$ ,  $\tau_r = 0.35\text{kgf/cm}^2$ 인 경우에 대해 진행성파괴를 고려할 때와 고려하지 않을 때의 극한인발력에 대해 비교 고찰하고, 앵커 앞면에서 발생하는 지압효과의 영향에 대해서도 약술한다.

#### (1) 진행성파괴를 고려하지 않을 때의 극한인발력( $T_u$ )

$$T_u = 1.5\text{kgf/cm}^2 \times \pi \times 80\text{cm} \times 500\text{cm} \approx 188.50(\text{tf})$$

#### (2) 진행성파괴를 고려할 때의 극한인발력( $T_p$ )

$$\text{잔류상태에 대한 인발력 } T_r = 0.35\text{kgf/cm}^2 \times \pi \times 80\text{cm} \times 500\text{cm} \approx 43.98(\text{tf})$$

따라서,  $T_r < T_p < T_u$ , 즉  $43.98\text{tf} < T_p < 188.50\text{tf}$

그런데, 洪碩佑(1994)에 의하면(표 6.3 참조), 그림 18에서의  $\tau$ 의 분포를 참고로 해서  $\tau$ 가 앵커체 깊이 방향으로 진행된다고 가정했을 때의 적분값은 74.07tf가 된다.  $T_u$ 에 통상의 안전율 2.5를 취하면, 허용인발력은 188.50tf/2.5 = 75.40tf가 되어 진행성이 고려되었을 때의

실제 마찰저항력 74.07tf와 비슷하다. 본 SI 앵커의 경우는 앵커체 정착장이 5m일 때 안전율 2.5에 못 미치는 경계상(안전율 0.98)에 있으므로 정착장이 5m를 넘으면 진행성과파괴를 고려하지 않는 종래의 설계법으로는 불안정한 설계가 되어 위험측이 된다.

(3) 진행성 지수(Progression Index, PGI)의 제안

본 연구에서는 SI 앵커의 진행성의 정도를 나타내기 위해, 진행성 지수(PGI)를 도입해서 식 (4)와 같이 정의하기로 한다. 이 PGI는 앵커체의 강성, 직경, 길이 및 지반상태 등 여러 가지 요인의 영향을 받을 것으로 생각되는데, 이에 대해서는 많은 현장실험을 통해 연구가 되어야 할 것이다.

$$PGI = \frac{T_u - T_p}{T_u - T_f} = \frac{188.50 - 74.07}{188.50 - 43.98} \approx 0.79 \quad (4)$$

여기서,  $T = T_u$  일 때  $PGI = 0$

$T = T_f$  일 때  $PGI = 1$

(4) 지압효과의 영향

앞의 (2)항에서 앵커체의 마찰저항력은 약 74.07tf이었다. 그런데, 그림 17에서 알 수 있듯이 앵커두부에서 측정된 극한인발력은 94.74tf를 넘는다. 여기서의 94.74tf - 74.07tf = 20.67tf의 저항력은 그림 19와 같은 지압력(q)에 의한 것이라고 생각할 수 있다.

그러나 일반적으로, SI 앵커는 견고한 깊은 지반에 정착하기 위해 무리하게 인장부를 길게 할 필요가 없이 주동파괴면(그림 19 참조)의 내측에 앵커두부가 타설되도록 하면 된다. 이

때, 주의할 점은 주동파괴면 부근의 그다지 깊지 않은 곳에 타설된 SI 앵커의 지압력은 극한 인발력에 포함시켜서는 안된다는 것이다.

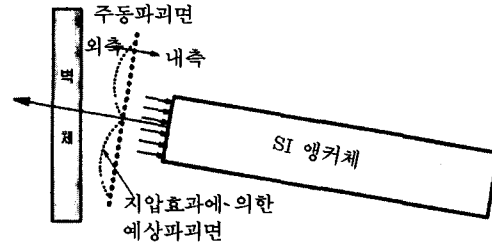


그림 19. 앵커 두부의 지압력의 발생과 주동파괴면의 위치

6.3 SI 앵커의 현장실험에서 구한 주면마찰 응력과 이론식과의 비교

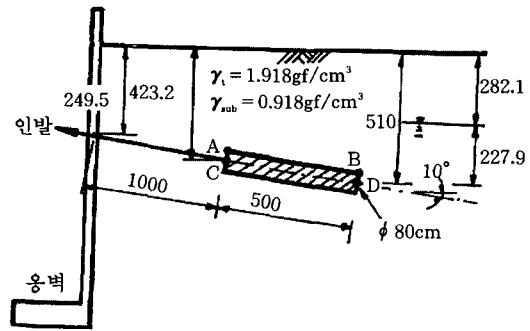


그림 20. 현장실험시 SI 앵커의 위치도, 단위 : cm

표 2. 현장실험시 SI 앵커체의 평균주면마찰저항력의 산정

①	최대주응력	$\sigma_{vA} = \sigma_{1A}$	0.634(kgf/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_{vB} = \sigma_{1B}$	0.714(kgf/cm <sup>2</sup> )
②	최소주응력	$\sigma_{3A}$	0.389(kgf/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_{3B}$	0.438(kgf/cm <sup>2</sup> )
③	상면수직응력	$\sigma_{rA}$	0.627(kgf/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_{rB}$	0.706(kgf/cm <sup>2</sup> )
④	측면수직응력	$\sigma_{rC}$	0.412(kgf/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_{rD}$	0.461(kgf/cm <sup>2</sup> )
⑤	평균수직응력	$\sigma_{AC}$	0.523(kgf/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_{BD}$	0.588(kgf/cm <sup>2</sup> )
⑥	평균주면마찰저항	$\tau_{uAC}$	0.729(kgf/cm <sup>2</sup> )	$\tau_{uBD}$	0.756(kgf/cm <sup>2</sup> )

5장에서 제안된 방법을 사용하여, 계산순서에 따라 그림 20에서의 SI 앵커의 평균주면마찰저항을 구하면 표 2와 같다.

이 값은 그림 18에서의 현장실측치와도 어느 정도 일치하는 것을 볼 수 있다. 그러나 이 산정식에 의한 계산치는 전 단면에 걸쳐 일정한 주면마찰저항을 보이는 강성이 큰 앵커의 경우의 실측치와 일치하기 때문에 진행성의 영향이 많이 나타나는 현장의 실험앵커와는 약간의 차이를 보인다. 따라서, 위의 평균주면마찰저항에다 식 (4)에서의 진행성 지수를 고려하여 인발저항력을 계산하면 다음과 같다.

$$T_p = (0.729 + 0.756) \times 1/2 \text{kgf/cm}^2 \times \pi \times 80 \text{cm} \times 500 \text{cm} \times \text{PGI} \approx 73.71 (\text{tf})$$

위에서 계산된 값은 실제로 측정한 마찰저항을 이용해서 구한 값(74.07tf)과 비슷한 것을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 제안된 PGI를 고려한 계산치가 평균주면마찰응력과 비슷하므로, 극한인발력 산정에 평균치로서 사용할 수 있다고 생각한다.

## 7. 결 론

SI 앵커는 앵커를 시공하기 어려운 풍화토 지반(N치가 15이하의 지반)에 시공하면 매우 효과적이다. N치가 15정도인 풍화토지반 내에 직경 5인치 정도의 일반적인 앵커를 타설할 경우, 앵커체 정착장을 길게 해도 진행성파괴의 영향으로 극한인발력은 별로 증대하지 않으므로(보통 10m 이상 부터는 극한인발력의 증대는 거의 없다고 하고 있음(韓國地盤工學會, 1997; 日本土質工學會, 1990), 전체구조물에 필요한 극한인발력을 얻기 위해서는 앵커수를 증가시킬 수 밖에 없다. 그러나, 앵커수를 늘여서 앵커 간격을 좁히면 근접구조물에 영향을 미칠 수도 있으므로, 이러한 사항을 감안하여, 앵커체의 표면적을 증대시켜서 극한인발력을 증대시키는 SI 앵커가 적절하다고 판단된다.

본 논문에서는 SI 앵커의 주면마찰저항의

산정식을 제안했는데 이는 풍화토 이하 사력층 등의 지반조건에서 사용하면 적합하며, 실내모형실험과 현장인발실험결과와 비교한 결과치가 비교적 잘 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

SI 앵커는 일반 인장형앵커와는 달리 지압저항을 받으므로, 주변지반의 거동이 달라지는 것을 실내모형실험과 사진분석법을 통해 확인할 수 있었는데, 개략적인 지압저항의 현장적용방법을 제시했다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 강제 경사앵커의 실내실험의 경우 진행성파괴의 영향이 거의 발생하지 않는 것을 볼때 앵커의 진행성 파괴는 주된 이유는 앵커의 신장에 의한 것이라고 판단된다.
- (2) 앵커가 지압저항을 받는 경우는 마찰저항만을 받는 경우보다 동일한 인발력에서 변위가 적게 일어나며 극한인발력도 훨씬 크게 나타난다.
- (3) SI 앵커는 인발시 앞부분에서 썩기 모양의 파괴면이 생기는 것을 확인할 수 있었고, 썩기가 진행하면서 지반이 회전하는 것을 발견하였다.
- (4) 현장실험결과 SI 앵커체의 강성에 따른 진행성의 정도를 파악하기 위해 진행성 지수(PGI)를 도입하였는데, 약 0.79로 나타났다.
- (5) 주면마찰응력 산정식에 의한 계산치는 실내실험 결과치와 비교적 잘 일치했다. 그러나, 강성이 적어 진행성의 영향이 많이 나타나는 현장앵커의 경우에는 진행성 지수(PGI)를 도입해서 보다 정확하고 안전하게 인발력을 구해야 한다.
- (6) SI 앵커는 마찰저항만에 의한 최대 인발력의 발휘 후에도 지압저항력의 증가로 인한 지속적인 인발력의 상승을 기대할 수 있다. 또한, 어떤 하중에 도달했을 때 갑작스런 인발파괴가 일어나지 않아 일반마찰방식 앵커보다 높은 안정성을 기대할 수 있다.

## 참 고 문 헌

- 1 金相允, 林鍾鐵, 洪碩佑(1993), “지반앵커의 인발에 따른 주면마찰응력의 변화”, 大韓土木學會 學術發表會 論文集.
- 2 林鍾鐵, 龍岡文夫(1989), “砂地盤内の 平面變形率 鉛直앵커의 模型實驗.” 大韓土木學會 學術發表會 概要集, pp. 460 - 463.
- 3 林鍾鐵, 龍岡文夫, 朴性栽(1990), “平面變形率 狀態에 있는 鉛直地盤앵커의 破壞 모드.” 대한 토질공학회지, 제 6권, 제 1호, pp. 43 - 56.
- 4 임중철, 전중배, 양태철, 이경준, 홍석우 (1992a), “SI 앵커의 인발저항 기구(II) - 인발시험 결과 및 고찰 -”, 大韓土木學會 學術發表會 論文集.
- 5 林鍾鐵, 朴性栽, 朱仁坤, 朴鏞富, 金永仁 (1992b), “平面變形率 狀態에 있는 模型地盤의 變形解析法”, 韓國地盤工學會誌 제 8권 제 1호 p. 30.
- 6 임중철, 김상윤, 홍석우, 강낙안(1994), “경사 지반앵커의 군효과에 대한 연구”, 韓國地盤工學會誌, 제 10권, 제 4호.
- 7 임중철, 홍석우, 주인곤(1996), “지반개량앵커(SI 앵커)의 개발과 현장에의 적용”, 釜山大學校 生産技術研究所 論文集 第 50輯, pp. 77 - 93.
- 8 韓國地盤工學會(1997), 굴착 및 흙막이 공법 - 지반공학 시리즈 3, 제 5장 앵커.
- 9 홍석우, 임중철, 전중배, 양태철, 주인곤(1992), “SI 앵커의 인발저항 기구(I) - 인발시험 장치 및 방법 -”, 大韓土木學會 學術發表會 論文集.
- 10 洪碩佑, 林鍾鐵, 金相允(1993), “SI 앵커의 인발에 따른 주면마찰응력의 변화”, 大韓土木學會 學術發表會 論文集.
- 11 洪碩佑(1994), “SI 앵커의 引拔抵抗力에 關한 研究”, 釜山大學校 工學碩士 學位論文.
- 12 林鍾鐵(1989), “砂地盤内のグラウンドアンカーの引抜き抵抗メカニズムに關する研究.” 日本東京大學 博士學位 論文.
- 13 日本土質工學會(1990), グラウンドアンカーの設計・施工基準, 同解説.
- 14 Andrawes, K. Z. and McGown, A., “Stereo-photogrammetric measurements of the kinematics within plane strain model of reinforced embankments,” *Developments in Soil Mechanics and Foundation Engineering - I*, pp. 231 - 261.
- 15 Baker, R.(1980), “Determination of the critical slip surface in slope stability computations,” *International Journal for Numerical and Analytical methods in Geomechanics, Vol. 4*, pp. 333 - 359.
- 16 Bendel, H.(1965), “Theorie und Versuche über die Berechnung der Tragfähigkeit und der Verankerungslänge mit Anwendungsbeispiel Vorträge”, gehalten an der Tagung der schweiz. Gesellschaft für Bodenmechanik und Fundamentstechnik, Erdanker System Stump Bohr AGL, in zürich.
- 17 Butterfield, R., Harkness, R. M. and Andrawes, K. Z.(1970), “A Stereo-photogrammetric method for measuring displacement field,” *Geotechnique*, Vol. 20, No.3, pp. 308 - 314.
- 18 Frydman, S. and Beasley, D. H.(1976), “Centrifugal modelling of riverbank failure.” *J. Geotech. Engng. Div., Proc. ASCE*, Vol. 102, pp. 395 - 409.
- 19 Jewell, R. A. and Wroth, C. P., “Direct shear test on reinforced sand”, *Geotechnique* 37-1, pp. 53 - 68.
- 20 Takagi, N., Nishio, N., Yoneyama, K. and Shimamura, K.(1983), “Development of a strain measurement system for soils and its application to sand around a buried pipe,” *Soils and Foundations*, Vol. 23, No. 3, pp. 65 - 79

(접수일자 1998. 9. 11)