

## 쏘일네일링 공법을 적용한 영구 지하굴착 벽체의 설계사례 연구

### Design Case Study of Permanent Excavation Wall Using Soil Nailing System

박시삼<sup>1)</sup>, Si-Sam Park, 이제만<sup>2)</sup>, Je-Man Lee, 유찬호<sup>3)</sup>, Chan-Ho Yoo, 김홍택<sup>4)</sup>, Hong-Taek Kim

<sup>1)</sup> GS건설(주) 기술본부 토질및기초팀 과장, Manager, Dept. of Geotech. Engrg., Technical Division, GS E&C Corp.

<sup>2)</sup> GS건설(주) 기술본부 토질및기초팀 과장, Manager, Dept. of Geotech. Engrg., Technical Division, GS E&C Corp.

<sup>3)</sup> 홍익대학교 공과대학 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Univ. of Hongik

<sup>4)</sup> 홍익대학교 공과대학 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engrg., Univ. of Hongik

**SYNOPSIS** : In case of soil nailing system, there have been many attempts to expand into slope and temporary earth retaining system stabilization method since the first ground excavation earth retaining system construction in 1993. Recently, jointing wall, underground wall of buildings and excavation earth retaining wall, construction were increasingly applied for effective utilization of the limited underground space and land application maximized. However, the application of joining wall into retaining wall or building by temporary soil nailing system and design of permanent wall were performed by using Rankine earth pressure theory without considering the distribution of earth pressure in the soil nailing.

In this study was performed to introduce the design case by 'Two-Body Translation mechanism (TBTM)' to be able to consider distribution of earth pressure in the soil nailing when designing the permanent jointing wall using soil nailing system for effective utilization of ground space. Also, this study attempts to evaluate the earth pressure change, decreasing effect of wall displacement and increasing effect of stability when advanced soil nailing system is constructed using *FLAC<sup>2D</sup> ver. 3.30* program and 'Two-Body Translation mechanism'.

**Key words** : Permanent jointing wall, Soil nailing system, Two-Body Translation mechanism

## 1. 서론

쏘일네일링 공법의 경우, 1993년 지하굴착 흩막이 공법으로 처음 적용된 이래 최근에는 절취사면 및 가시설 흩막이 안정화 공법 등의 분야에 그 적용성이 더욱 확대되고 있는 실정이며, 이에 관한 이론적 연구 및 실무적 응용기술들은 국내에서도 계속적으로 진보되고 발전되고 있는 추세이다. 최근 국내 도심지에서 지반굴착 가설공법으로 적용되고 있는 쏘일네일링 공법은 주변 인접건물이나 도로 또는 지중 매설물 등으로 인해 주변의 지반변형이 매우 억제되어야 하는 이유로 인하여, 연성 전면벽체(숏크리트 및 와이어메쉬) 보다는 상대적으로 강성인 벽체(CIP, SCW, JSP, H-pile+토류판 등)가 선호되고 있으며, 더불어 도심지의 특성상 협소한 지하공간의 효율적 활용과 토지활용 극대화 측면에서, 지하주차장 등 건축물 등의 지하벽체와 합벽시공이 점차적으로 증가하고 있는 추세이다. 그러나, 가설 쏘일네일과 건축물 및 옹벽 등의 벽체와 합벽시공할 경우, 네일에서의 토압분담효과 등에 대한 영향을 고려하지 않고 일반적인 Rankine 토압으로 설계, 시공하여 이중으로 보강공사비용이 투입되고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 Gassler(1988)가 제안한 'Two-Body Translation Mechanism (TBTM)'을 이용한 안정해석기법을 수정하여, 네일의 토압분담효과를 반영할 수 있는 설계기법을 제시하였으며, 본 연구

에서 제안한 설계기법을 적용하여 옹벽의 두께를 상당부분 감소한 현장설계 사례를 소개하고자한다. 아울러 본 설계사례에 적용된, 지반이완을 최소화 하면서 도심지 굴착이 가능한 자천공 쏘일네일링(Self Drilled Soil Nailing, SDSN) 공법 및 가압 강관 쏘일네일 공법 등의 적용성을 *FLAC<sup>2D</sup> ver. 3.30* 프로그램을 이용하여 확인해 보았으며, 본 연구에서 제시한 설계기법을 토대로 계산된 토압을 수치해석 결과와 비교, 검토해 보았다.

## 2. 네일의 토압분담 효과를 고려한 설계기법

### 2.1 개요

도심지 지하굴착에 있어서 영구벽체의 두께 결정을 위한 각 지점별 토압 크기는 가설벽체에 적용되는 판이론 해석기법 및 TBTM을 이용한 해석절차 등을 토대로 산정할 수 있으며(그림 1), 본 연구에서는 TBTM을 이용한 Gässler(1988)의 안정해석법을 수정한 설계기법을 소개하고자 한다.

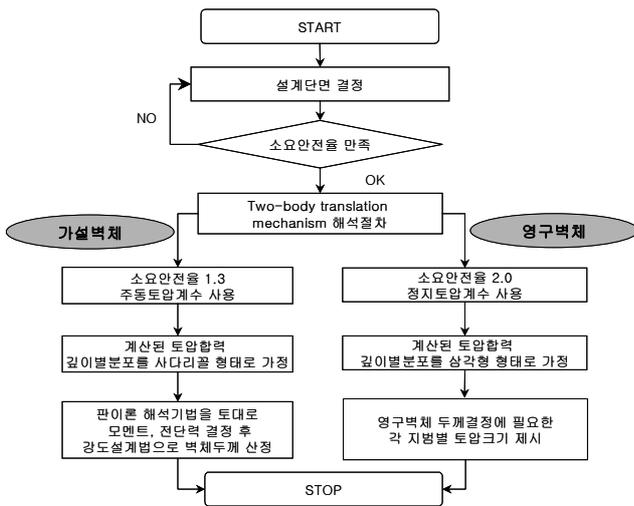


그림 1. 벽체두께 결정을 위한 설계절차

구조적으로 안정성이 유지되는 가설벽체(연성벽체) 슛크리트의 두께 결정은 김 등(1997)이 제시한 판이론 해석기법을 토대로 검토하며, 또한 영구벽체의 두께 결정을 위한 각 지점별 토압 크기는 가설벽체에 적용되는 TBTM 해석절차를 요약, 정리하면 그림 1과 같다. 그림 1의 해석절차를 토대로 쏘일네일이 설치된 영구 지하굴착 벽체두께를 검토할 경우, 네일의 토압분담효과를 고려하지 않고 벽체두께를 결정할 경우에 비해, 보다 경제적이고 합리적인 벽체두께를 결정할 수 있을 것으로 판단된다.

### 2.2 Two-Body Translation Mechanism을 이용한 토압산정 설계기법

네일의 토압분담 효과를 고려한 토압산정 설계기법은 Gässler의 안정해석법을 수정하여 다음과 같이 나타낼 수 있다(그림 2). 그림 2에 나타난 수평방향의 힘과 연직방향의 힘의 평형식은 다음 식 (1) 및 (2)와 같으며,

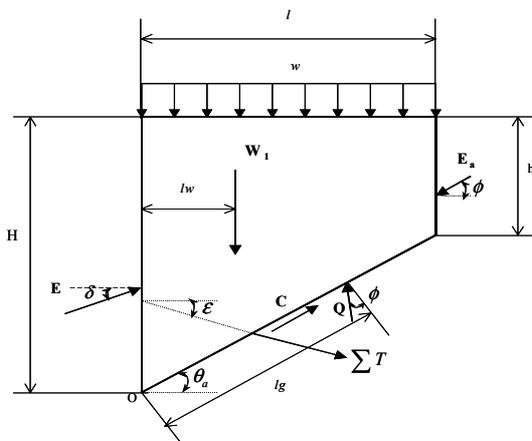


그림 2. 네일로 보강된 토체의 힘의 분포

$$\Sigma V = 0 ; \quad E \sin \delta - \Sigma T \sin \epsilon + Q \cos(\theta_a - \phi) = W_1 + wl + E_a \sin \phi - cl \tan \theta_a \quad (1)$$

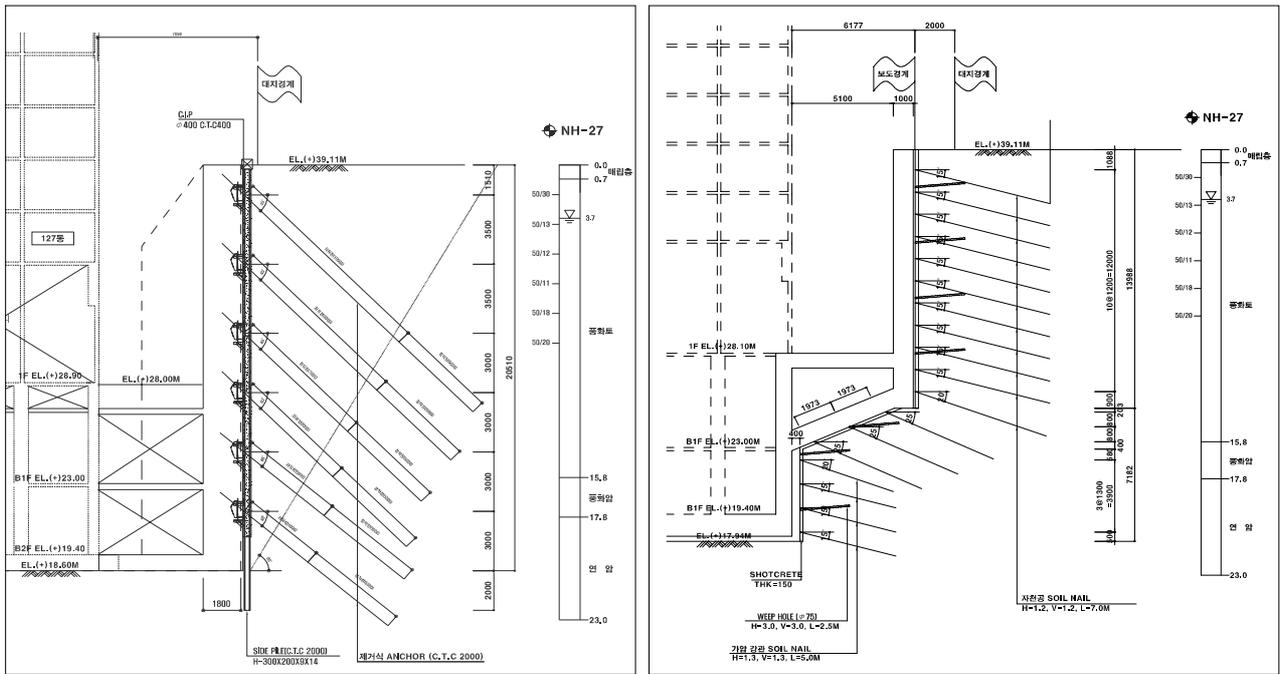
$$\Sigma H = 0 ; \quad E \cos \delta + \Sigma T \cos \epsilon - Q \sin(\theta_a - \phi) = E_a \cos \phi - cl \quad (2)$$

여기서,  $W_1 = \frac{1}{2} \gamma l (2H - l \tan \theta_a)$ ,  $E_a = \frac{1}{2} K \gamma h^2$ ,

$K =$  토압계수,  $w =$  상재하중

식 (1) 및 (2)의 방정식을 정리하면, 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.





(a) 원설계

(b) 변경설계

그림 4. 대표단면

### 3.2 쏘일네일의 토압분담효과를 고려한 벽체두께 산정

본 연구에서는 2절에서 제시한 네일의 토압분담효과를 고려하여 벽체두께를 산정하는 설계기법을 토대로, 그림 4의 대표단면에서 슬라브가 설치되지 않은 상부구간(H=11.11m)에 작용하는 토압을 산정하였으며, 이를 토대로 벽체두께 감소효과도 살펴보았다. 네일의 토압분담효과를 고려한 변경설계 단면의 토압 산정시, 부분안전율 2.0을 적용하였으며, 토압계수는 정지토압계수를 적용하였다. 아울러, 앵커로 설계된 원설계 단면의 토압 및 벽체두께의 경우 MIDAS/SET 프로그램을 이용하여 평가하였으며, 평가에서 적용된 지반강도정수는 표 1과 같으며, 평가결과는 표 2와 같다.

표 1. 분석에 적용된 지반강도 설계정수

구 분	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$c$ (kPa)	$\phi$ (°)	$K_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	$E$ (kPa)	$\nu$
매립층	17.65	0.0	20.0	11767	14709	0.35
풍화토	19.61	24.52	34.0	39223	58839	0.33
풍화암	20.59	34.32	36.0	49029	98066	0.31
연암	22.55	49.03	38.0	63737	156906	0.27

표 2. 네일의 토압분담 효과를 고려한 토압 및 벽체두께 감소효과

구 분	원설계 (앵커+옹벽)	변경설계 (쏘일네일+옹벽)
토 압	270.66 kPa	193.29 kPa
영구 지하굴착 벽체의 필요두께	1.70 m	1.08 m

표 2를 살펴보면, 네일의 토압분담효과를 고려함에 따라, 영구 지하굴착 벽체에 작용하는 전체토압의 28.59% 정도에 해당하는 토압을 네일에서 분담하고 있는 것으로 나타났다. 아울러, 영구 지하굴착 벽체의 소요두께를 평가한 결과를 살펴보면, 네일의 토압분담효과를 고려한 변경설계의 경우가 원설계의 경우에 비해 36.5% 정도의 벽체두께 감소효과가 있는 것으로 평가되었다.

## 4. 수치해석을 통한 설계사례 분석

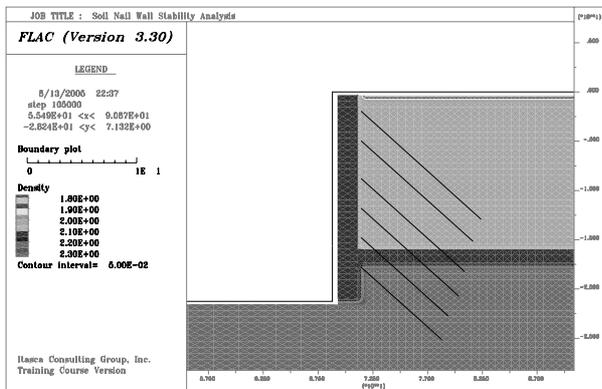
### 4.1 수치해석 모델링 개요

Schlosser(1993)와 Juran 등(1990)은 네일의 휨강성 증가로 인한 안전율 증가 및 지반의 수동저항능력의 감소를 유발하는 것으로 보고한바 있으며, 이러한 점에 착안하여 박 등(2004, 2005)은 일반 쏘일네일링 공법에 비해 진보된 응용기술인 자천공 쏘일네일링 공법 및 가압 강관 쏘일네일링 공법을 개발하였다. 따라서 굴착면 인접구조물의 피해를 최소화하기 위해, 변경설계 2안으로 결정하였으며, 원설계, 변경설계 1안 및 변경설계 2안에 대한 수치해석을 시행하여, 지하굴착시 유발될 수 있는 벽체변위 및 안정성 등에 대한 평가를 수행하였다(표 3). 아울러 본 연구에서 제시한 네일의 토압분담효과를 고려할 수 있는 설계기법을 토대로 평가된 토압감소율을 수치해석 결과와 비교, 검토해 보았다.

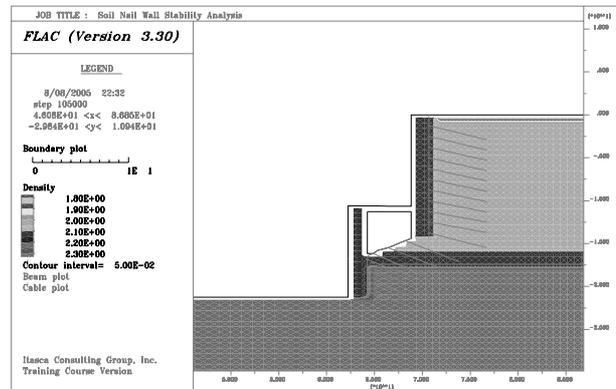
표 3. 대표단면의 보강공법 설계(안)

구 분	보 강 공 법	수평 설치간격	영구벽체의 두께
원 설 계	C.I.P. + 앵커	2.00 m	1.80 m
변경설계 1안	일반 쏘일네일	1.20 ~ 1.40 m	1.10 m
변경설계 2안	자천공 쏘일네일 (상부구간) + 가압 그라우팅 강관 네일 (하부구간)	1.20 ~ 1.40 m	1.10 m

본 수치해석이 시행된 원설계 및 변경설계 대표단면의 격자요소망은 그림 4와 같으며, 지반 모델링의 경우 탄·소성 모델인 Mohr-Coulomb Failure Criterion을 적용, 흙막이 벽체에 적용되는 쏘크리트는 빔요소(Beam element)로 모델링 하였다. 또한 보강재가 강관으로 구성되어있는 자천공 쏘일네일 및 가압 강관 쏘일네일의 경우, 강관네일의 인장력, 휨강성 및 전단강성 등을 합리적으로 고려할 수 있는 말뚝요소(Pile element)로 모델링 하였으며, 보강재의 강도특성치는 표 4와 같다.



(a) 원설계 (영구옹벽시공시)



(b) 변경설계 (영구옹벽시공시)

그림 4. 해석격자망

표 4. 강관 보강재의 강도특성치

구 분	공칭단면적 (cm <sup>2</sup> )	단면2차모멘트 (mm <sup>4</sup> )	항복인장강도 (MPa)	극한전단강도 (MPa)	항복휨강도 (MPa)	탄성계수 (MPa)
일반 쏘일네일	5.067	29040	392.2	-	-	205939
자천공 쏘일네일	2.733	29040	735.49	425.1	187.9	147099
가압 강관네일	4.564	115204	519.7	570.3	262.2	15690

원설계의 경우, 앵커시공을 위한 top-down 방식의 단계별 굴착(8 단계, 2m 굴착) 이후, bottom-up 방식의 영구옹벽 시공시 앵커두부를 제거하여 시공하는 시공절차(9 단계, 옹벽시공)와 동일하게 해석을 수행하였으며, 슬라브가 설치되는 영구옹벽 하부구간은 고정단(fix)으로 처리하였다(그림 4(a) 참조). 또한 변경설계 1안 및 2안의 경우, 시공순서와 가능한 동일하게 top-down 방식의 단계별 굴착(8 단계, 2~3m 굴착), 최종굴착시공 이후 bottom-up 방식의 영구옹벽 합벽시공(9 단계, 옹벽시공)의 순으로 해석을 수행하였으며, 이때 쓰일네일 지압판의 스테드 볼트가 영구옹벽의 철근과 연결 처리되는 부분은 힌지(hinge)로 처리하였으며, 슬라브가 시공되는 영구옹벽 하부구간의 경우 고정단(fix)으로 모델링하여 해석을 수행하였다(그림 4(b) 참조).

#### 4.2 쓰일네일의 토압분담효과

옹벽시공이 완공된 시점(9 단계)에서의 해석결과를 토대로, 쓰일네일 설치 유, 무에 따른 상부옹벽(H=11.11m)에 작용하는 수평응력분포를 평가해 보았으며, 그 결과는 그림 5와 같다.

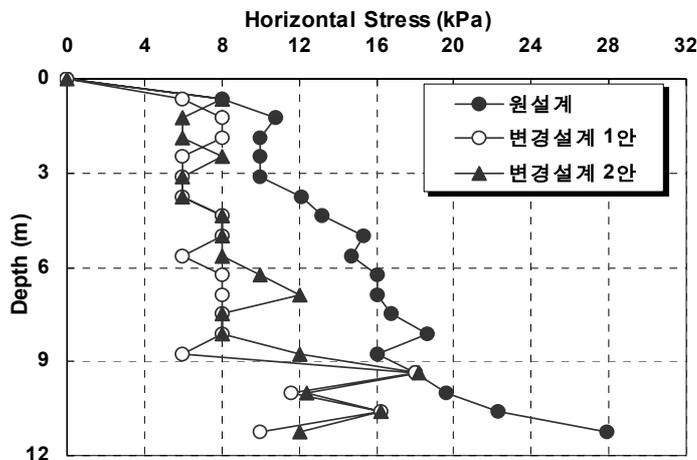


그림 5. 전면벽체에 작용하는 심도별 토압

그림 5의 결과를 살펴보면, 앵커 두부를 해체하면서 시공하는 영구벽체(원설계)에 작용하는 토압분포는 삼각형분포의 토압분포를 나타내는 것으로 나타났으며, 네일과 옹벽이 합벽처리되는 변경설계 1안 및 2안의 경우 사다리꼴 모양의 토압분포 경향을 나타내는 것으로 평가되었다. 아울러 자천공 쓰일네일링 공법을 적용한 경우(변경설계 2안)가 일반 쓰일네일링 공법을 적용한 경우(변경설계 1안)에 비해 토압분담효과가 다소 큰 것으로 나타났다.

또한 수치해석 결과 평가된 수평응력을 토압으로 변환하면, 원설계의 경우 275kPa 정도, 변경설계 2안의 경우 172kPa 정도로 평가되어, 2장에서 제시한 네일의 토압분담효과를 고려한 설계기법을 토대로 산정된 옹벽에 작용하는 토압과 유사하게 평가되었다(표 2 참조). 따라서 2장에서 제시한 Gässler의 안정 해석법을 수정한 네일의 토압분담효과를 고려할 수 있는 설계기법의 경우, 쓰일네일링 공법과 옹벽을 합벽 처리하여 시공할 경우 매우유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

#### 4.3 강관 보강재의 휨강성에 따른 변위억제효과

지하굴착이 시행되는 시공 초기단계(1단계~8단계)에서부터 옹벽이 시공되는 시공단계(9단계)까지 유발되는 수평 및 수직 변위 양상을 살펴보기 위한 수치해석이 수행되었으며, 그 결과는 그림 6 및 7과 같다.

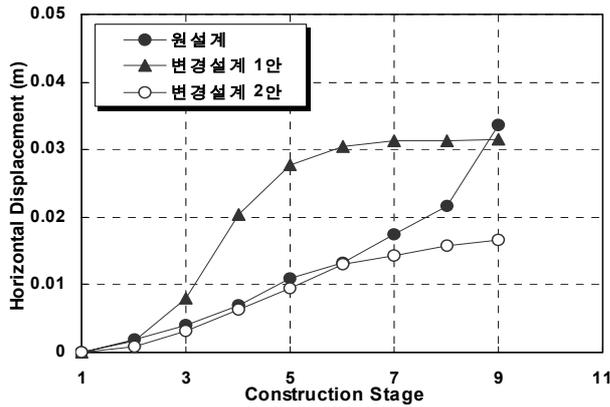


그림 6. 시공단계별 유발되는 수평변위

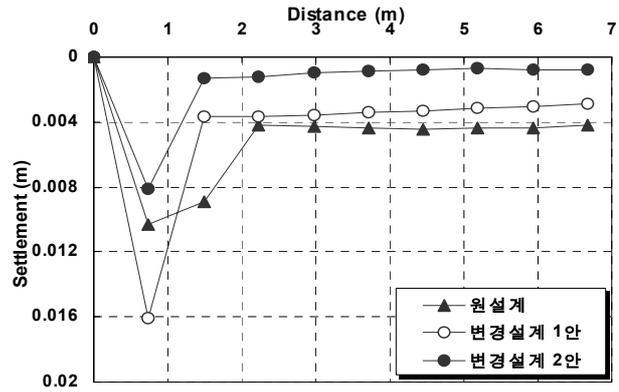


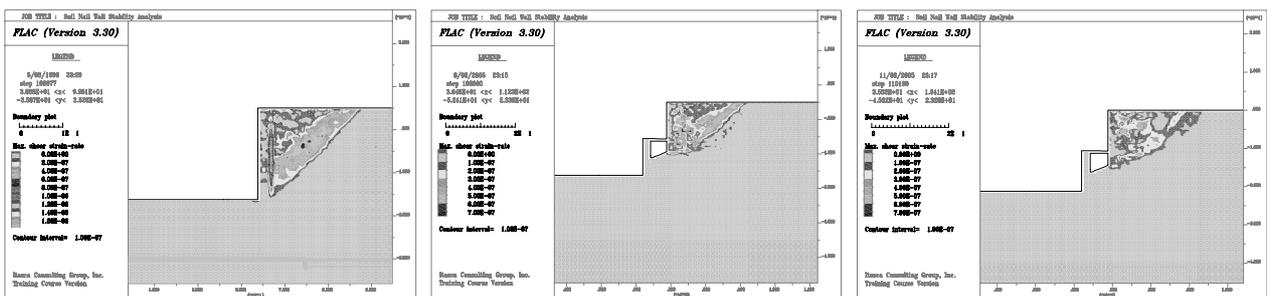
그림 7. 최종굴착시 유발된 인접지반의 침하량

10m 정도의 굴착시점(5 단계)에서의 해석결과를 토대로 지하굴착시 유발되는 수평변위량을 살펴보면, 일반 쏘일네일링 공법을 흠막이 공법으로 적용한 변경설계 1안에서 유발되는 변위량(2.7cm)에 비해, 자천공 쏘일네일링 시스템을 적용한 변경설계 2안에서 유발되는 수평변위량은 65% 정도, 앵커공법을 적용한 원설계에서 유발되는 수평변위량은 59% 정도 감소하는 것으로 나타났다(그림 6 참조). 아울러, 옹벽이 시공되는 시점(9단계)에서 유발되는 수평변위량을 살펴보면, 원설계의 경우 앵커해체로 인해 주변지반의 응력이 이완되어 수평변위가 급격히 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 이형철근을 사용하는 일반 쏘일네일링 공법에 비해 휨강성 및 전단강성이 큰 고강도 강관을 사용하는 자천공 쏘일네일링 공법을 적용하는 경우가 수평변위억제효과가 상대적으로 큰 것으로 나타났다.

또한 옹벽이 시공되는 시점에서 유발된 침하량을 살펴보면, 보강재의 전단강성 및 휨강성이 큰 고강도 강관을 사용하는 자천공 쏘일네일링 시스템을 적용한 변경설계 2안의 경우 유발되는 수직변위량이 0.8cm 정도로서, 유발되는 수직변위량이 가장 작은 것으로 평가되었다.

#### 4.5 강관 보강재의 휨강성에 따른 안정성 증대 효과

옹벽시공이 완공된 시점(9 단계)에서의 해석결과를 토대로, 전단강도감소기법을 도입하여 *FLAC<sup>2D</sup> ver. 3.30* 프로그램 해석결과를 도시하면 그림 8과 같다.



(a) 원안설계 (F.S=1.41)

(b) 변경설계 1안 (F.S=1.99)

(c) 변경설계 2안 (F.S=2.15)

그림 8. 전단강도 감소기법에 의한 대표단면 안전율

그림 8의 안정성 검토를 통해 평가된 예상최소안전율을 살펴보면, 자천공 쏘일네일링 공법을 적용한 변경설계 2안의 경우가 일반 쏘일네일링 공법을 적용한 변경설계 1안에 비해 8% 정도의 안전율 상승효과가 있는 것으로 나타났다. 아울러 앵커시공후 앵커를 해체하면서 옹벽을 시공하는 원설계의 경우, 옹벽의 전체안전율이 1.41로서 영구벽체의 설계기준안전율(F.S=1.5)을 상회하지 못하는 다소 불안정한 상태인 것으로 나타났다.

## 5. 결론 및 제언

본 연구에서는 Gässler가 제안한 TBTM을 이용한 안정해석기법을 수정하여, 네일의 토압분담효과를 반영할 수 있는 설계기법을 제시하였으며, 본 연구에서 제안한 설계기법을 적용하여 옹벽의 두께를 상당부분 감소한 현장 설계사례를 *FLAC<sup>2D</sup> ver. 3.30* 프로그램 등을 이용하여 비교, 분석하였다. 본 연구를 통해 얻어진 결과를 요약, 정리하면 다음과 같다.

- (1) 옹벽시공시 슬라브가 설치되지 않는 합벽옹벽 상부구간(H=10.11m)에 작용하는 토압을 산정해본 결과, 네일의 토압분담효과를 고려함에 따라 전체토압의 28.59% 정도의 토압감소효과가 있는 것으로 나타났다. 따라서 지하굴착 벽체를 쏘일네일과 합벽 시공할 경우 36.6% 정도의 벽체두께 감소효과가 있는 것으로 나타났다(표 2 참조).
- (2) 옹벽시공이 완공된 시점(9 단계)에서의 해석결과를 토대로, 쏘일네일 설치 유, 무에 따른 상부옹벽(H=10.11m)에 작용하는 수평응력 분포결과를 살펴보면, 앵커 두부를 해체하면서 시공하는 영구벽체(원설계)에 작용하는 토압분포는 삼각형분포의 토압분포를 나타내는 것으로 나타났으며, 네일과 옹벽이 합벽처리되는 변경설계 1안 및 2안의 경우 사다리꼴 모양의 토압분포 경향을 나타내는 것으로 평가되었으며, 본 연구에서 제시한 쏘일네일 토압분담효과를 고려한 설계기법을 통해 산정된 토압과 거의 유사한 경향을 나타내는 것으로 평가되었다(그림 5 참조).
- (3) 자천공 쏘일네일링 공법을 적용한 경우(변경설계 2안)가 일반 쏘일네일링 공법을 적용한 경우(변경설계 1안)에 비해 토압분담효과가 다소 큰 것으로 나타났다.
- (4) 10m 정도의 굴착시점(5 단계)에서의 해석결과를 토대로 지하굴착시 유발되는 수평변위량을 살펴보면, 일반 쏘일네일링 공법을 흠막이 공법으로 적용한 변경설계 1안에서 유발되는 변위량(2.7cm)에 비해, 자천공 쏘일네일링 시스템을 적용한 변경설계 2안에서 유발되는 수평변위량은 65% 정도, 앵커공법을 적용한 원설계에서 유발되는 수평변위량은 59% 정도 감소하는 것으로 나타났다(그림 6 참조).
- (5) 옹벽시공이 완공된 시점(9 단계)에서의 안정성 검토를 통해 평가된 예상최소안전율을 살펴보면, 자천공 쏘일네일링 공법을 적용한 변경설계 2안의 경우가 일반 쏘일네일링 공법을 적용한 변경설계 1안에 비해 8% 정도의 안전율 상승효과가 있는 것으로 나타났다. 아울러 앵커시공후 앵커를 해체하면서 옹벽을 시공하는 원설계의 경우, 옹벽의 전체안전율이 1.41로서 영구벽체의 설계기준안전율(F.s=1.5)을 상회하지 못하는 다소 불안정한 상태인 것으로 나타났다(그림 8 참조).

## 참고문헌

1. 김홍택, 황정순, 김효진(1997), “쏘일네일링 전면벽체 해석기법의 체계화 및 최상단 네일의 한계설치 깊이 평가”, **한국지반공학회** 가을학술발표회, pp.189~196.
2. 박시삼, 박지현, 정성필, 김홍택(2004), “자천공 쏘일네일링 시스템의 인발거동특성 및 적용성 평가”, **한국지반공학회**, 2004 정보화시공 기술위원회 가을학술세미나, pp.155~162.
3. 박시삼, 이훈연, 유찬호, 김홍택(2005), “자천공 쏘일네일링 시스템 개발을 위한 기초연구” 대한토목학회, 2005 학술발표회 논문집(계제예정).
4. Gässler, G.(1988), “Soil Nailing Theoretical Basis and Practical Design”, International Geotechnical Symposium on Theory and Practice of Earth Reinforcement, Balkema, pp.283~288.
5. Hong-Taek Kim, In-Kyu Kang, Young-Ho Kyun, Si-Sam Park, Young-Hoon Cho(2002), “An Experimental Study of Soil Nailed Wall Behavior with Front Plate Rigidity”, *Jour. of the KGS* Vol. 18, No. 3, pp. 87~94.
6. Juran, I., Baudrand, g., and Farrag, K.(1990), “Kinematical Limit Analysis for Design of Soil-Nailed Structures”, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 116, No. 1, pp.54~72.
7. Schlosser, F.(1993), *Recommendations Clouterre, 1991* (English Translation), Federal Highway Administration, FHWA-SA-93-026.