KSS Fall '96 National Conference / 25-26, October, 1996 / Seoul / Korea

쏘일네일로 보강된 지하굴착벽체의 3차원 거동분석

Analysis of Three-Dimensional Behavior of Nailed-Soil Excavation Wall

김홍택[1], Hong-Taek Kim, 고용일[2], Yong-Il Koh, 권영호[3], Young-Ho Kwon

[1] 홍익대학교 토목공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil Engr., Hong-Ik Univ.
[2] 한라건설 기술연구소 차장, Deputy General Manager, R & D Center, Halla Engr. & Constr. Corp.
[3] 한라건설 기술연구소 대리, Assistant Manager, R & D Center, Halla Engr. & Constr. Corp.

SYNOPSIS : Three-dimensional behavior of nailed-soil excavation walls, including the effect of the existence of the corner on the wall deflection, was studied in the present paper by analyzing a typical excavation with layered subsoil. Using the results of FLAC program analyses for various cases, a simple approximate relationship defined as plane strain ratio (P.S.R.) was made for estimating three-dimensional maximum wall deflection of a nailed-soil excavation system based on the results of a two-dimensional plane-strain analysis.

Key words : excavation, soil nailing, wall displacement, 3-D analysis, P.S.R., corner effect

1. 서 론

흙막이 구조물 뿐만 아니라 사면, 교대 등에 대한 해석은 대부분 2차원적 접근방식, 즉 평면변형율(plane-strain) 조건하에서 이루어 지고 있는 실정이다. 2차원 평면변형율 조건하의 해석은 비교적 빠른 시간내에, 간편하게 결과를 얻을 수 있으므로 대부분의 토류구조물의 설계에 적용되는 방법이라 할 수 있다. 그러나, 한 예를 들어, 해석하고자 하는 구조체가 종방향으로 길이가 비교적 짧고 또한 모서리 부분등이 존재하는 경우 2차원 평면변형률 해석만으로는 지점별 변위등 실제의 제반거동에 대한 정확한 예측이 어려울 것이다.

최근에 들어 지반공학을 포함한 토목공학 수치해석분야 전반의 급속한 성장과 더불어 과거에는 이론상의 제약조건 또한 시간적, 경제적등의 이유로 기피하게 되었던 3차원적 접근방식이, 대상 구조체의 3차원적 모사기술(3-D simulation technique)의 발달등으로 인해, 이제는 2차원적 해석에만 의존하던 해석 및 설계가 3차원적 접근쪽으로 그 폭을 점차 넓혀 가고 있는 추세이다. 그러나 실제의 제반거동을 비교적 충분히 반영하는 3차원적 해석 또한 결과를 얻기까지 상당히 많은 시간이 소요되고, 비교적 큰 용량의 컴퓨터가 필요하며, 해석단면의 격자망 작성(grid generation)이 쉽지 않고, 또한 프로그램이 원하는 만큼의 기능을 가지고 있지 못하거나, 계산되어진 값들에 대한 신뢰성 및 수렴여부가 해석조건(기하학적 조건, 요소수 등)에 따라 많은 영향을 받게되는 등 아직까지도 필요로 하는 여러분야에 손쉽게 적용하기는 어려운 실정이다.

본 연구에서는 최근에 들어 지하굴착 및 사면보강 등의 목적으로 점차 적용사례가 증대되고 있는 쏘일네일링(soil nailing) 공법중, 지하굴착 쏘일네일링 벽체에 대한 3차원적 거동을 살펴보기 위해 모서리부 및 중앙부 등 지점별 벽체변위를 분석하고, 2차원 평면변형율 조건하에서는 고려하기 어려운 네일(nail)의 배치형태(삼각형 및 사각형 배치형태)에 따른 영향을 분석하였다. 또한 Ou등(1996)이 제안한 P.S.R.(plane-stain ratio)을 이용한 3차원 영향평가 기법을 쏘일네일링 지하굴착벽체의 경우에 적합하도록 수정하여, 결과적으로는 3차원 해석을 직접 수행하지 않고도 2차원 평면변형율 조건하의 해석결과를

이용하여, 모서리 효과(corner effect)가 반영된 쏘일네일링 지하굴착벽체의 지점별 발생변위등 3차원 거동을 간접적으로 예측할 수 있는 해석도표등을 한정적으로 제시하였다.

2. 해석조건

2.1 해석단면 및 모델링 개요

본 해석에 적용된 쏘일네일링 지하굴착벽체의 단면은 개략적으로 그림 1과 같으며, 지층은 상부로부터 매립층, 실트질 점토층, 풍화암 및 연암층 등의 총 4개층으로 구성되고, 상재하중 및 지하수는 존재하지 않는 것으로 가정하였다. 각 지층별 두께 및 선정된 강도정수는 아래의 표 1과 같다. 그림 1의 단면에 대해 2차원 한계평형해석을 홍익대학교에서 개발된 KK-NAIL 프로그램을 이용해 실시한 바, 본 단면의 경우 예상되는 전체안전율은 1.5 정도이다.

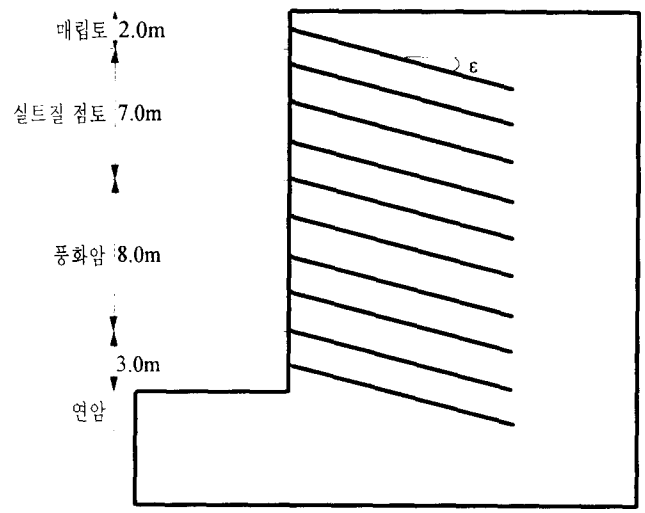


그림 1. 쏘일네일링 지하굴착벽체 단면

표 1. 해석에 적용된 각 지층별 강도정수

지 층	층별 두께 (m)	단위중량 (t/m^3)	내부마찰각 (°)	점착력 (t/m^2)	포아슨비 (ν)	탄성계수 (t/m^2)
매립토	2	1.7	30	0	0.4	1600
실트질 점토	7	1.7	25	4.5	0.38	1000
풍화암	8	1.9	37	5	0.35	15000
연암	이하지층	2.0	40	15	0.30	30000

또한 본 연구에서는 유한차분해석 프로그램인 FLAC 2D 및 FLAC 3D(Version 1.1)가 사용되었다. 2차원 및 3차원 해석시 동일한 조건하에서의 해석을 위하여, 지반거동은 Mohr-Coulomb 모델로, 10cm 두께의 전면판 숏크리트(shotcrete) 벽체는 콘크리트의 탄성계수를 적용한 선형탄성재로 가정하였다. 아울러 네일의 거동은 축력이 전달되는 케이블 요소(cable element)로 다루어 졌다. 그림 1의 단면에 설치된 네일의 제원은 표 2와 같다.

표 2. 해석에 적용된 네일의 제원

네일 길이 (m)	삽입각도 ε (°)	네일 직경 (mm)	천공 직경 (cm)	항복강도 (t/m^2)	탄성계수 (kg/cm^2)	최상단 네일의 설치 깊이 (m)	수평간격 (m)	수직간격 (m)
12	15	25	10	24000	2.1×10^6	1	2	2

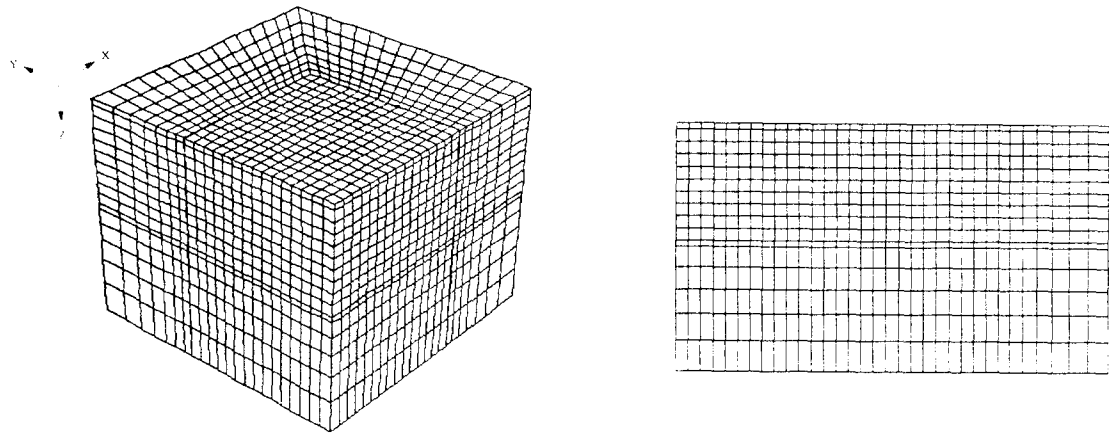
이외에도, 발휘되는 각 네일의 최대마찰저항 R_f는 네일의 항복강도 이하의 값이므로, 유한차분해석시 다음의 조건을 적용하였다.

$$R_f = \frac{\pi \cdot D_{hole} \cdot \tau_f \cdot L}{S_h \cdot L} \leq \frac{A_{nail} \cdot \sigma_y}{S_h \cdot L} \tag{1}$$

위의 식(1)에서 D_{hole}, A_{nail}은 각각 그라우트(grout)체의 직경 및 네일의 단면적을 나타내고, τ_f 및 σ_y는 발휘되는 네일의 전단응력 및 항복강도이다. 또한 L, S_h는 네일의 길이, 수평설치간격을 의미한다.

2.2 기하학적 조건

그림 2의 (a) 및 (b)는 각각 3차원 및 2차원 해석단면을 나타내며, 좌우경계면 및 바닥면은 각각 로울러(roller) 및 힌지(hinge)로 가정하였다. 본 해석단면의 총 굴착깊이는 지표면 하부 20m까지 이고, 설치되는 수직방향 네일의 총갯수는 10개(수직설치간격 = 2m)이며, 전면판은 10cm두께의 선형탄성체 요소로 격자망을 작성하였으며, 단계별 분할굴착 해석을 수행하였다. 또한 3차원 해석결과와 2차원 평면변형율(plane-strain) 해석결과를 서로 비교하기 위하여, 동일한 격자망을 지닌 단면을 선정하였다. 3차원 해석에서는 많은 요소를 작성할 경우, 비교적 큰 용량의 컴퓨터가 필요할 뿐만 아니라 오랜시간이 소요되거나 경우에 따라서는 해석자체가 불가능할 경우도 발생될 수 있으므로, 가능한 해석의 정확성을 저하시키지 않는 범위내에서 요소수를 감소시킬 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 Ou등(1996)의 연구결과를 참고로 하여 효율적인 해석단면의 격자망을 작성하였다. 또한 직사각형 평면 형태의 굴착단면을 대상으로 하였으므로, 3차원 해석단면은 x 및 y 방향으로 대칭임을 고려하여 1/4 단면만을 대상으로 직접적인 해석을 수행하였다.



(a) 3차원 해석단면 (b) 2차원 해석단면

그림 2. 해석단면의 격자망

본 연구에서는 굴착단면의 기하학적 조건에 따른 영향등을 분석하기 위하여, 변위가 평가되는 벽체를 주벽체(primary wall)라 하고, 주벽체에 직각방향인 벽체를 보조벽체(complementary wall)라 가정하였다 (그림 3).

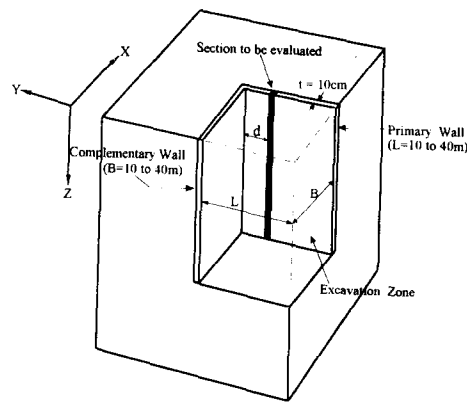


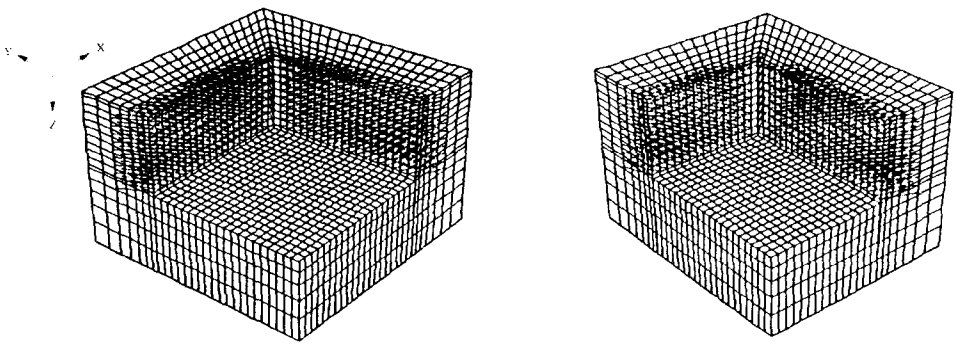
그림 3. 기하학적 조건

3. 벽체거동 분석

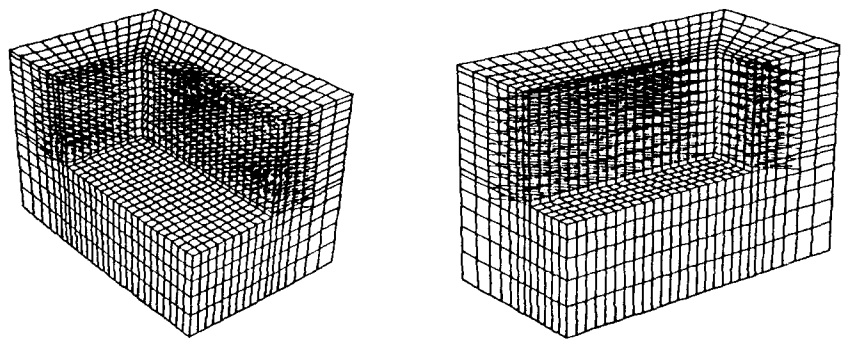
그림 4는 대표적인 해석단면으로서, 보조벽체 길이(B, 그림 3)가 40m인 경우에 주벽체의 길이(L, 그림 3)를 10, 20, 30 및 40m로 변화시킨 단면을 각각 보여준다. 본 연구에서는 주벽체의 길이 및 보조벽체의 길이 변화에 따른 영향등을 분석하기 위하여, 주벽체 및 보조벽체의 길이를 10m에서 40m까지 10m씩 순차적으로 변화시키면서 총 16개 단면에 대한 해석을 수행하였다(표 3).

표 3. 해석단면별 벽체길이

B (m)	10				20				30				40			
L (m)	10	20	30	40	10	20	30	40	10	20	30	40	10	20	30	40



(a) L=40m 단면 (b) L=30m 단면

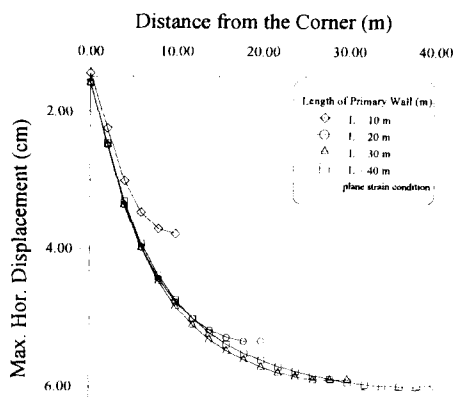


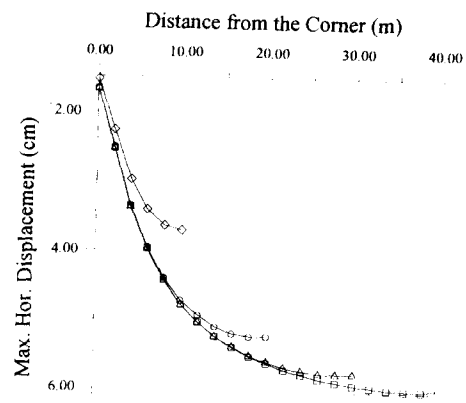
(c) L=20m 단면 (d) L=10m 단면

그림 4. 보조벽체의 길이(B)가 40m인 경우의 해석단면

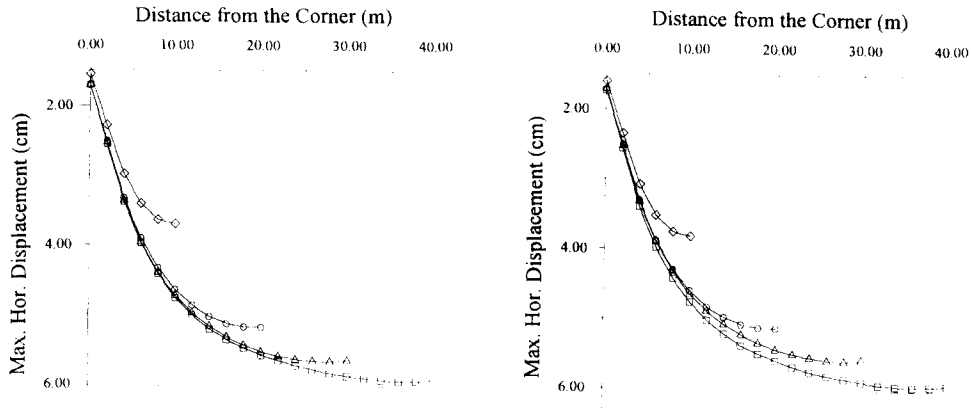
3.1 주벽체(Primary Wall) 길이(L)의 영향

굴착단면의 벽체변위에 미치는 주벽체 길이의 영향을 분석하기 위하여, 보조벽체의 길이(B)는 일정하게 유지하고, 주벽체의 길이(L)를 다양하게 변화시켜가며 해석을 수행하였다(L=10, 20, 30 및 40m).





(a) B = 10m 단면 (b) B = 20m 단면



(c) B = 30m 단면 (d) B = 40m 단면

그림 5. 주벽체의 길이(L) 변화에 따른 벽체의 최대수평변위

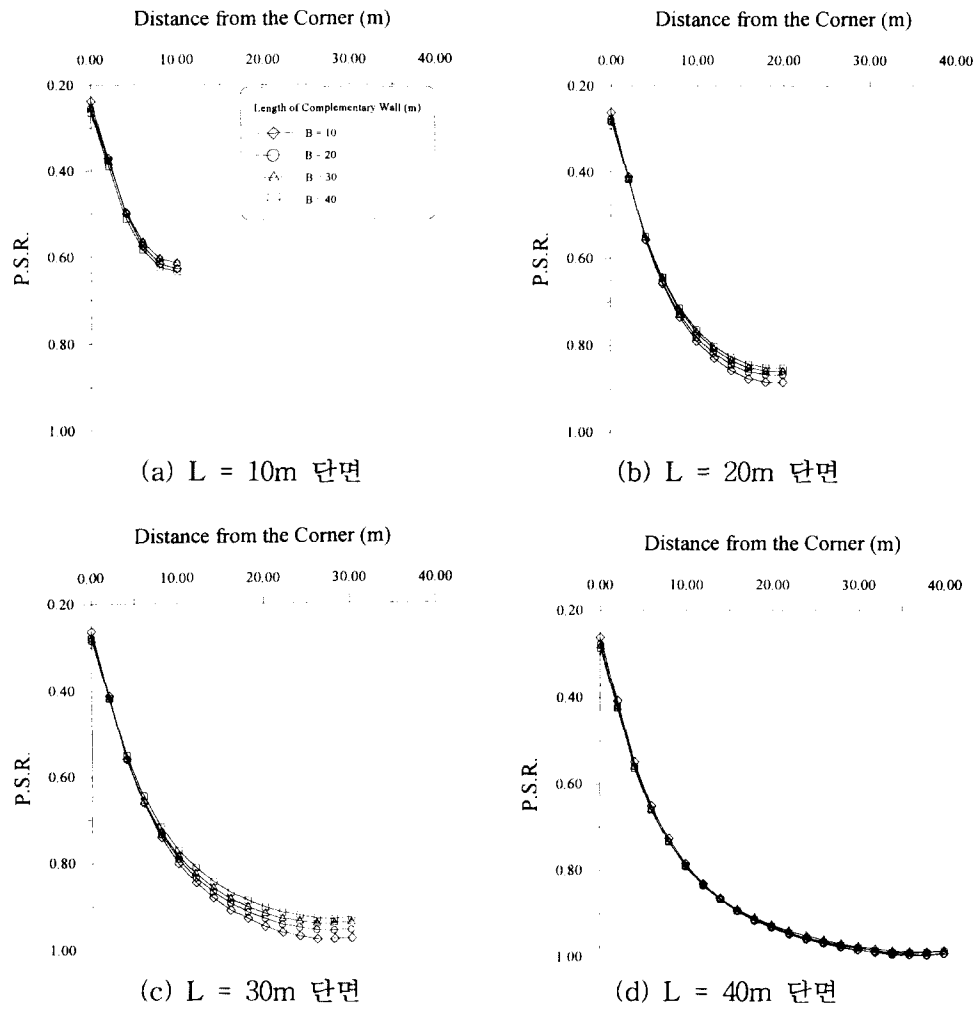
그림 5는 보조벽체의 길이(B)가 10, 20, 30 및 40m인 경우 각각에 대해, 주벽체의 길이(L)를 10, 20, 30 및 40m로 변화시켜, 각 경우의 최종굴착단계에서, 모서리 부터 중앙부 까지의 최대수평변위 변화를 도시한 결과이다. 그림 5에서, 점선은 모서리 부터 중앙부 까지 일정한 크기의 변위를 가정하는 일반적인 2차원 평면변형율 해석결과를 의미한다. 그림 5의 해석결과를 살펴보면, 주벽체의 길이가 감소됨에 따라 최대수평변위 또한 작아짐을 알 수 있으며, 아울러 보조벽체의 길이가 증가할수록(B ≥ 10m) 주벽체의 길이 감소에 따른 최대수평변위의 감소효과는 더욱 커지는 것을 알 수 있다.

3.2 보조벽체(Complementary Wall) 길이(B)의 영향

본 분석에서는 Ou등(1996)이 지중연속벽체(slurry wall) 굴착공사에 대한 3차원적 벽체거동을 분석하기 위하여 제시한 P.S.R. 기법이 이용되었다. P.S.R.은 2차원 평면변형율 조건하에서의 최대수평변위(δ_{ps})에 대한 3차원 조건에서의 지점별 최대변위(δ)의 비로서, 평면변형율비(plane-strain ratio, P.S.R.)를 의미한다.

모서리가 존재하는 전형적인 다각굴착에서 P.S.R. 값의 범위는 $0 < P.S.R. < 1$ 이며, P.S.R.이 1에 가까운 값을 나타낼수록 모서리 효과(corner effect)를 적게 받는 즉 2차원 평면변형율 상태에 가까운 단면을 의미하며, 반대로 P.S.R. 값이 작을수록 모서리에 매우 가깝거나 또는 주벽체가 매우 짧은 단면을 의미한다.

그림 6은 일정한 길이(L)의 주벽체에 대해, 보조벽체의 길이(B)를 변화시켜 이에 따른 영향을 살펴본 결과이다. 그림 6의 결과를 분석하면, 주벽체의 길이가 증가됨에 따라 쏘일네일링 지하굴착벽체의 최대수평변위는 커지는 현상을 보이고 있으며, 또한 주벽체의 길이가 동일한 경우, 보조벽체의 길이가 길어질수록 굴착벽체의 최대수평변위는 더욱 억제되는 현상 즉 보조벽체의 길이가 길수록 모서리 효과가 더욱 증대되는 현상을 알 수 있다. 또한 주벽체의 길이(L)가 30m인 경우까지는, 주벽체의 길이가 커지는 경우 보조벽체의 길이 증가에 따라 모서리 효과가 동시에 증대되는 경향을 보이나, 주벽체의 길이가 30m를 초과하는 경우(L=40m인 경우)에는 보조벽체의 길이와는 무관하게 거의 비슷한 크기의 변위량을 나타내고 있음을 알 수 있다.



(a) L = 10m 단면 (b) L = 20m 단면

(c) L = 30m 단면 (d) L = 40m 단면

그림 6. 보조벽체의 길이(B) 변화에 따른 쏘일네일링 지하굴착벽체의 최대수평변위

3.3 네일의 배치형태에 따른 영향

일반적으로 네일은 삼각형 또는 사각형 배치형태로 시공되고 있으나, 이로 인한 벽체거동의 차이점등에 대해서는 구체적인 분석결과가 거의 제시된 바 없는 실정이다. 본 분석에서는 시공되는 네일의 총 갯수는 같으나, 배치형태가 서로 다른 두가지 경우에 대해 3차원 해석을 통해 그 영향을 알아보고자 하였다. 그림 7은 B=20m, L=20m인 경우에 배치형태가 서로 다른(삼각형 및 사각형 배치형태) 두가지 경우의 벽체 최대수평변위 해석결과를 나타내고 있다. 그림 7에서 보는 바와 같이, 쏘일네일링 굴착벽체의 최대수평변위량은 전체적으로 큰 차이를 보이고 있지는 않으나, 삼각형 배치형태의 네일이 사각형 배치형태의 네일에 비해 모서리 부분에 가깝게 설치될 경우에는 부분적으로 모서리 부분의 수평변위가 미소하나마 감소하는 현상을 보임을 알 수 있고, 이와는 달리 사각형 배치형태의 네일이 모서리 부분에 보다 가깝게 설치될 경우에는 반대현상이 나타나는 것을 알 수 있다.

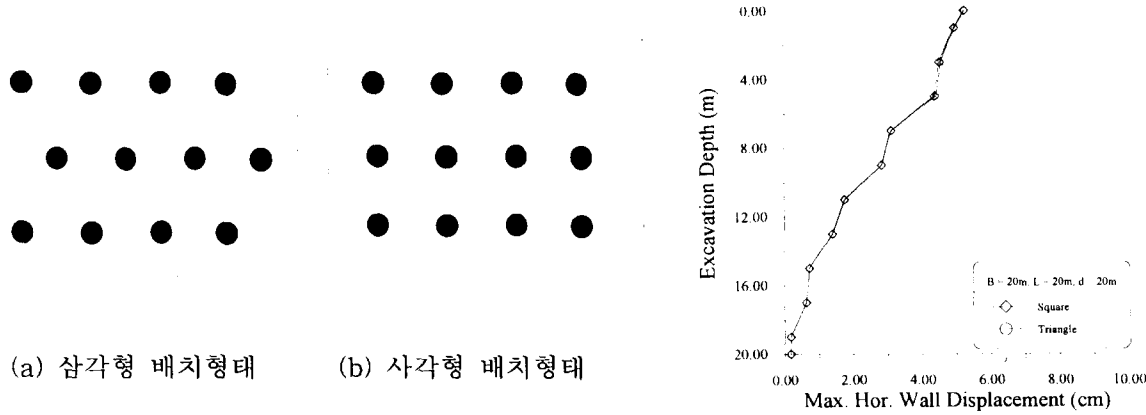


그림 7. 네일의 배치형태에 따른 쏘일네일링 굴착벽체의 수평변위

4. P.S.R. 분석

본 연구에서 수행된 여러 해석결과를 토대로 회귀분석을 시행하여, 주벽체에 대한 보조벽체의 길이비(B/L, 그림 3 참조) 및 모서리로 부터의 거리(d, 그림 3 참조)와 P.S.R.값 사이의 관계를 도표화하면 그림 8과 같다. 그림 8의 도표는 주벽체 및 보조벽체의 길이가 10 ~ 40m 까지 변화하는 경우를 토대로 작성된 것이므로, 실제 적용시에는 대칭성을 감안할 때 주벽체 및 보조벽체의 길이가 20 ~ 80m 범위내의 조건인 경우까지 직접적인 관계가 있다고 할 수 있다. 그림 8의 도표를 이용하여 3차원적 거동을 예측하는 경우, 쏘일네일링 지하굴착벽체의 길이(B 및 L) 및 변위를 알고자 하는 지점까지의 거리(d)로부터 P.S.R. 값을 구한 후, 2차원 평면변형율 해석을 통해 산정된 수평변위에 해당 P.S.R. 값을 곱함으로써($\delta = \delta_{ps} \times P.S.R.$), 모서리 효과가 고려된 해당지점 벽체의 수평변위등을 예측할 수 있다.

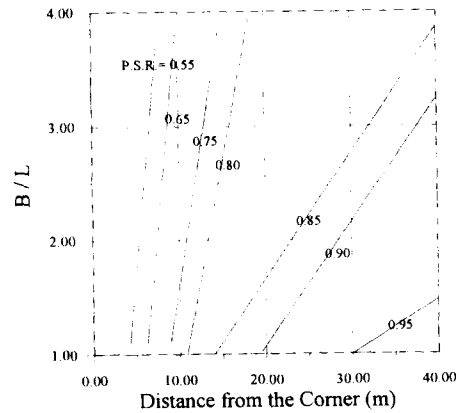


그림 8. B/L-d-P.S.R. 관계 도표

그림 9는 그림 8에서 제시된 도표를 이용하여 실제 해석을 수행한 결과로서, 굴착단면의 형태는 그림 10과 같다. 굴착대상 부지의 면적은 80m×40m 이며, 수평변위 알고자 하는 지점(d)는 모서리로 부터 각각 24m, 12m 떨어진 지점이다. 지층조건 및 네일의 제원 등은 표 1 및 2와 동일하며, 최종굴착심도 또한 지표면 하부쪽 20m 지점까지 이다. 그림 9-(a)는 d=24m 지점에서의 벽체 최대수평변위로서, P.S.R 기법에 의한 예측결과는, 2차원 평면변형율 조건하에서의 해석결과에 약 75%에 해당되는 값을 나타내고 있으나, 3차원 해석결과와는 비교적 유사한 값을 보이고 있다. 또한 그림9-(b)는 d=12m 지점에서의 벽체 최대수평변위로서, 이 경우에 P.S.R 기법에 의한 예측결과와 2차원 평면변형율 해석결과와의 차이는 더욱 크게 나타나고 있으나, d=24m 지점의 경우와 마찬가지로 3차원 해석결과와는 비교적 유사한 값을 나타내고 있다.

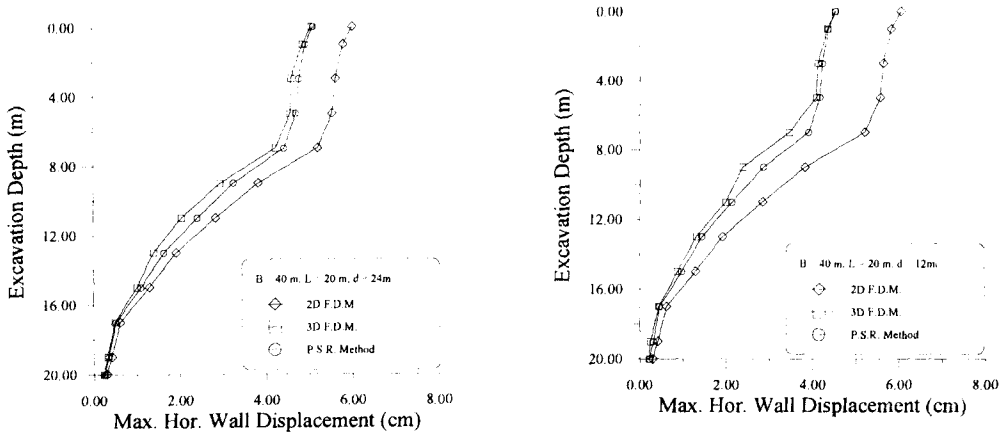


그림 9. P.S.R. 기법의 적용예

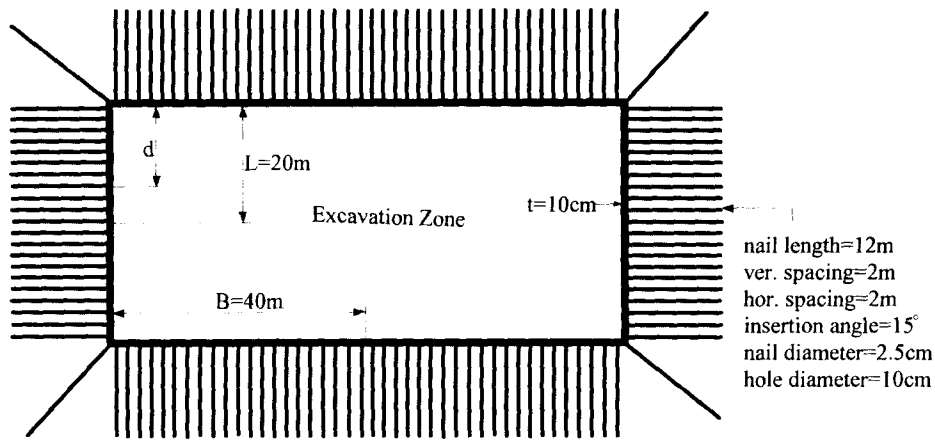


그림 10. 굴착 평면도

5. 모서리 효과(Corner Effect)

다각굴착의 경우에는 모서리가 존재함으로써, 발생되는 쏘일네일링 지하굴착벽체의 수평변위는 중앙부에서 최대가 되고 모서리부에서 최소의 값이 나오는 경향을 보인다. 이러한 현상은 모서리의 존재가 직접적인 원인으로서, 모서리가 존재함으로 인하여 추가적으로 발생되는 수평방향 하중전이(load transfer) 현상으로 설명할 수 있다. 그림 11은 사각굴착형태의 쏘일네일링 벽체에서 하중전이 현상의 매카니즘을 개략적으로 보여주고 있다. 그림 11-(a)는 수직방향의 하중전이 형태의 개요도로서 일반적으로 2차원 해석에서는 이와같은 수직방향의 하중전이 현상만이 고려되어질 수 있다. 그러나 실제적으로는 모서리부가 존재함으로 인하여 수직방향의 하중전이 현상 뿐만 아니라, 그림 11-(b)와 같이 벽체에 작용하는 토압(하중)이 모서리부를 통하여 직각방향으로 전달되는 수평방향 하중전이 현상이 추가적으로 발생될 것이다. 이러한 모서리부의 수평방향 하중전이 현상으로 인하여 모서리부 부근의 수평방향 변위는 크게 억제되는 현상을 보이며, 중앙부로 갈수록 변위 억제효과가 점차 감소하는 경향을 보이게 된다. 따라서 이러한 원인등에 의해 일반적인 사각굴착에서는 굴착벽체의 중앙부에서 수평변위가 최대가 되는 형태로 나타나게 되며, 이러한 하중전이 현상은 3차원적인 쏘일아칭(soil arching)으로도 표현할 수 있다.

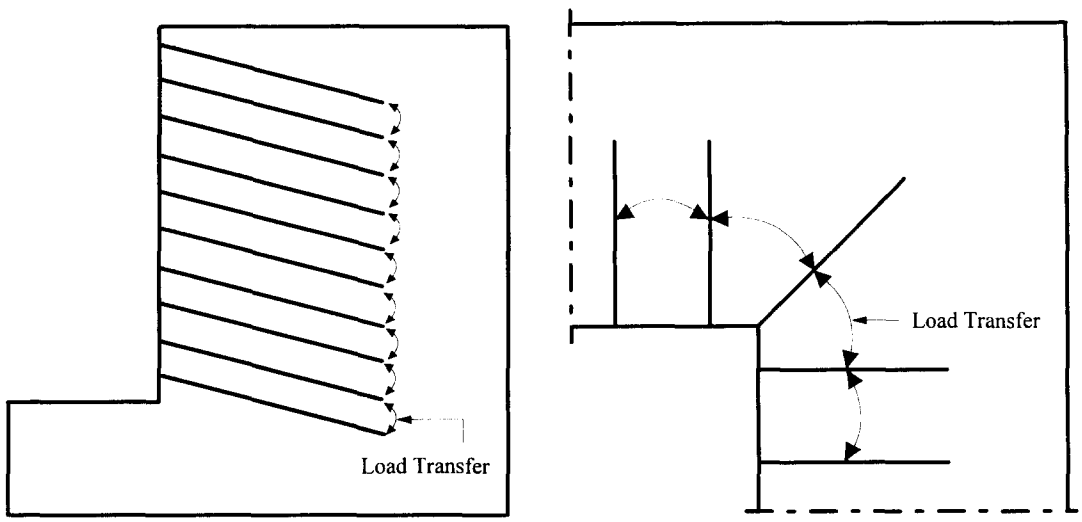


그림 11. 쏘일네일링 공법이 적용된 사각굴착에서의 3차원적인 쏘일아칭(soil arching)

6. 결 론

본 연구에서는, 사각굴착 형태의 쏘일네일링 지하벽체에 대한 FLAC 2D 및 3D 프로그램 해석을 통하여, 굴착벽체거동등에 대해 주벽체 및 보조벽체의 길이 변화등에 따른 3차원적인 영향을 분석하였다. 또한 부분적이긴 하나 네일의 배치형태에 따른 영향을 분석하였고, Ou등(1996)이 제안한 P.S.R.(plane stain ratio)을 이용한 3차원 영향평가 방식을 쏘일네일링 지하굴착벽체에 적합하도록 수정하여, 결과적으로는 3차원 해석을 직접 수행하지 않고도 2차원 평면변형율 조건하의 해석결과를 이용하여, 모서리 효과(corner effect)가 반영된 쏘일네일링 지하굴착벽체의 지점별 발생변위등 3차원 거동을 간접적으로 예측할 수 있는 해석도표를 제시하였으며, 이를 이용한 실제의 변위예측을 한정적으로 수행하였다.

향후 추가적인 분석 및 지속적인 자료의 수집 등을 통해, 본 연구의 예측결과를 실제 현장의 계측결과와 서로 비교하는 검증·확인 작업등 궁극적으로는 쏘일네일링 지하굴착벽체의 3차원적 안정해석법을 정립하는 것이 장차의 연구과제이다.

참고문헌

1. Duncan, J. M., and Chang, C. Y.(1970), "Nonlinear analysis of stress and strain in soils", *Jour. of Soil Mech. and Found. Div.*, ASCE, Vol. 94, pp. 637-659.
2. Itasca Consulting Group, Inc.(1996), *FLAC3D Version 1.1-User's Manual.*
3. Ou, C. Y., Chiou, D. C., and Wu, T. S.,(1996), "Three-dimensional finite element analysis of deep excavaions", *Jour. of Geotech. Engrg. Div.*, ASCE, Vol. 122, pp. 337-345.
4. Sinha, R. S., et al.(1989), *Underground Structures-Design and Instrumentation*, Elsevier, pp. 84-128.