

원심모형실험을 이용한 소일네일링 벽체의 거동 및 파괴메카니즘에 관한 연구

김영길^{1*}

¹한림성심대학교 토목과

A Study on the Behavior and Failure Mechanism of Soil Nailing Walls using Centrifuge Model Tests

Young-Gil Kim^{1*}

¹Department of Civil Engineering, Hallym Polytechnic University

요약 현재 사용되고 있는 소일네일링 구조물에 관한 설계 및 해석법들은 실내모형실험이나 원형실험 또는 수치해석 결과를 바탕으로 주변지반과 보강네일 사이의 상호작용 메카니즘을 달리 적용함으로써 서로 다른 안전율을 제시하고 있다. 이러한 해석법들은 네일의 강성도나 지반조건 등이 가정된 바와 같이 잘 일치할 경우에는 합리적인 설계법이 될 수 있다. 하지만 이와 조건이 다른 경우 부적절한 결과를 가져올 가능성이 크다. 따라서, 본 연구에서는 원심모형시험기를 사용하여 소일네일링 구조물의 거동과 파괴메카니즘에 관한 매개변수적 실험을 실시하였다. 매개변수적 실험에서는 네일의 길이 및 설치각, 네일과 전면판의 강성도 등을 다양하게 변화시키면서 모형벽체가 파괴될 때까지 증력수준을 증가시키는 자중실험을 실시하였다. 실험으로부터 얻어진 결과를 바탕으로 매개변수의 변화에 따른 영향, 파괴메카니즘 등을 비교분석하였다.

원심모형실험 결과와 현재 사용되고 있는 방법들과 비교 검토함으로써 기존 방법들에 대한 타당성을 검증하였다.

Abstract Current design and analyzing methods about soil nailing structures, developed on the basis of results obtained from experiments in laboratory or in field and numerical analyses, have applied different interaction mechanisms between the reinforced nails and the surrounding ground, and different safety factors against failure have been obtained. They might be proper approaches if the assumptions about rigidity of nails and ground conditions are met with actual conditions occurred in field. Otherwise, they would result in designing on analyzing in inappropriate ways so that it is needed to evaluate the validity of them. Therefore, in this research using the Centrifugal Model Testing, numerical parameters experiments about soil nailing structures' behavior and failure mechanism were performed. In the numerical parameters experiments, transmuted nail's length, setting angle, nail's front panel, stiffness variously, and increased the level of gravity until wall model was destroyed. Based on experimental results, we compared the effect, failure mechanism caused from parameters changes. By reviewing and comparing centrifugal model test results and methods currently in use, verified validity of existing methods.

Key Words : Soil nailing wall, G-level, Parametric centrifuge model tests, Selfweight test

1. 서론

해마다 사면붕괴 사고로 인하여 많은 인명과 재산 피해를 입고 있고, 도심지의 좁은 공간에서 지반굴착공사

날로 늘어가고 있는 국내실정에 비추어볼 때 흙 속에 보강재를 삽입하여 지반의 안정을 도모하는 이른바 지반보강공법이 최근 토목공사에서 주목을 받고 있으며, 이에 관한 많은 연구·개발을 통하여 다양한 공법이 제시되어

*교신저자 : 김영길(kimygil@hsc.ac.kr)

접수일 11년 10월 27일

수정일 (1차 11년 11월 21일, 2차 11년 12월 02일)

게재확정일 11년 12월 13일

각종 구조물 공사에 폭넓게 사용되고 있다[13]. 국내에는 1993년 가시설 흠막이 벽체에 처음으로 적용된 이후 시공과정의 간편성, 경제성 등으로 인해 가시설 또는 비탈면 보호공으로 널리 적용되고 있다.

Bang 등[13] 많은 연구자들에 의해 기존의 설계 및 해석법의 개발, 적용성 확대를 위한 활발한 연구가 진행되어 왔으며, 더불어 다양한 설계 및 해석법들이 제시되었다. 이러한 설계 및 해석법들은 안전율, 파괴메카니즘의 가정, 흠과 보강네일 사이의 상호작용, 네일의 저항력 산정 등에 있어서 서로 다르게 정의하고 있다. 현재 사용되고 있는 설계 및 해석법들은 서로 다른 두가지 접근법을 토대로 발전되어 왔다. 즉, 한계평형이론을 바탕으로 한 데이비스 방법[9], 독일방법[10], 프랑스 방법[8] 등과 운동학적 한계평형 개념을 바탕으로 한 운동학적 한계해석법[3,4] 등이 있다. 국내에서는 김준석[15]이 비교적 큰 실험용 토체에 대한 재하시험을 통하여 토체의 파괴거동을 분석하고 수평변형의 경향을 제시하고 수직토압의 변화양상을 보고하였다. 김홍택 등[2]은 천공과 동시에 보강재 삽입, 그라우터 충전이 가능한 자천공 소일네일링을 개발하였고, 영구사면 보강목적의 소일네일링에서 발생하는 그라우트 균열문제를 해결하기 위해 방추형 콘 네일링을 개발하였다. 그러나, 기존의 설계 및 해석법들[11]은 주로 축소모형실험이나 원형실험[14] 결과를 바탕으로 주변지반과 보강네일 사이의 상호작용 메카니즘을 달리 적용함으로써 각기 다른 가정 및 안전율을 제시하고 있다.

이러한 해석법들은 보강네일의 강성도나 지반조건 등이 가정된 바와 같이 잘 일치할 경우에는 합리적인 설계 및 해석법이 될 수 있으나 이와 조건이 다른 경우 부적절한 결과를 가져올 가능성이 크다. 그러므로, 기존의 설계법에 대한 타당성 및 보다 합리적인 설계법을 제안하기 위해서는 소일네일링 구조물의 거동 및 파괴메카니즘에 대한 좀 더 정확하고 충분한 자료의 획득이 요구된다.

이를 위해서는, 실물크기와 동일한 원형실험(prototype test)을 수행하고, 그 결과를 토대로 토류구조물의 설계 및 해석방법을 제시하는게 가장 바람직하며 최상의 방법이다. 하지만 다양한 설계변수, 경계조건과 초기조건 등을 변화시키면서 소일네일링 벽체의 거동 및 파괴메카니즘을 규명하는데 있어서 실험형 실험은(large-scale test) 축조에 따른 시간적, 경제적인 문제가 발생한다. 한편, 기존의 실험에서는 축소모형을 제작 설치하여 수행하는 축소모형실험(reduced model test)이 시간적, 경제적인 측면에서 많이 사용되어 오고 있지만 토립자의 자중에 의한 응력(body force)효과 및 상사법칙(similarity rule)이 고려되지 않은 상태에서 실험이 수행되기 때문에 그 결과의

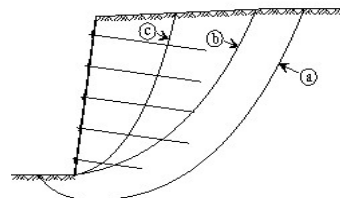
신뢰성에 상당히 의문이 제기되고 있다. 이것은 흠의 역학적 거동이 응력수준(stress level)에 의해 지배되기 때문에 현장 구조물에서 발생하는 큰 초기응력과 실험실내의 소규모 모형실험에서 유발되는 작은 초기응력의 상대적인 차이에 의해서 비롯된다. 이와 같은 축소모형실험이 갖고 있는 문제점을 해결하기 위한 대안으로 최근 선진 외국에서는 원심모형시험기가 토질공학 분야의 새로운 연구 장치로 많이 활용되고 있다[1,5,6].

원심모형실험에서는 실험실에서 잘 제어된 방법으로 시료를 성형하므로 시료의 물성 및 경계조건 등을 정확히 알 수 있다. 또한, 축소모형을 사용하므로 다양한 설계변수를 자유자재로 변화시키면서 실험할 수 있고 축소모형실험의 단점인 낮은 응력상태를 원심모형실험에서는 그대로 재현할 수 있는 장점을 지니고 있다.

본 연구에서는 원심모형시험기를 사용하여 소일네일링 벽체의 거동과 파괴메카니즘에 관한 다양한 매개변수적 실험을 실시하였다. 매개변수적 실험에서는 네일길이와 설치각 특히, 기존의 일반모형실험에서 재현할 수 없었던 굴착깊이, 전면판과 네일의 강성도 등에 따른 영향을 파악하고자 모형 구조물을 원심기에 설치하여 인위적으로 뒤채움재의 자중을 증가시켜 모형의 파괴를 유도하였다. 이와 같은 원심모형 실험 결과를 바탕으로 극한평형방법에 의한 이론과 비교 검토함으로써 기존 방법에 대한 타당성을 검증하였다.

2. 설계 및 해석법

지난 20년간 소일네일링 구조물에 관한 여러가지 설계 및 해석법이 개발되어 왔다. 이들 설계 및 해석법에서는 극한평형이론을 바탕으로 파괴 메카니즘, 흠/보강재 사이의 상호작용 및 보강된 네일에서 발생하는 저항력 산정 등에 있어서 표 1과 같이 서로 다른 가정 및 안전율을 적용하여 설계하고 있다. 전체 안전율 산정을 위한 파괴 메카니즘은 그림 1과 같이 내부파괴, 혼합파괴, 외부파괴 등으로 분류된다.



[그림 1] 파괴형태의 종류
 (a) 외부파괴 (b) 혼합파괴 (c) 내부파괴
 [Fig. 1] Failure types

[표 1] 각 해석법의 특징

[Table 1] A Characteristic of analytical methods

해석법 특징	독일 방법	데이비스 방법	프랑스 방법
해석방법	극한 힘 평형법에 의한 전체안전성해석	극한 힘 평형법에 의한 전체 안전성 해석	극한모멘트 평형법에 의한 전체 안전성 해석
입력 재료값	흙 강도정수, 수평 마찰력	흙 강도정수, 극한네일강도, 수평 마찰력	흙 강도정수, 극한네일강도, 흙 강성
네일 작용 힘	인장력	인장력	인장력, 전단력, 모멘트
파괴면	이선형	포물선	원호, 임의형상
파괴 메카니즘	인발파괴	혼합파괴	혼합파괴
안전율	1.0	1.5	1.5
인발저항력	1.5~2.0	1.5	1.5
인장력 힘모멘트	항복응력	항복응력	항복응력, 소성모멘트
해석결과	전체안전율 국부안전율	전체안전율 국부안전율	전체안전율 국부안전율
지하수위	고려못함	고려못함	고려
지층고려	고려못함	고려못함	고려
재하조건	경사하중	등분포하중	경사, 임의하중
구조물 형상	경사, 수직벽면	수직 벽면	임의의 형상

현재 설계 및 해석법에 주로 사용되고 있는 데이비스 방법[9]은 극한상태의 힘의 평형원리에 근거하여 가상 파괴면을 유한요소 해석[13]을 통한 수치해석 결과로부터 벽체의 저면 선단부를 통과하는 포물선으로 보고 내부파괴 및 혼합파괴가 발생하는 것으로 가정하였다. 내부파괴의 경우, 안전율을 구하기 위하여 파괴면과 최상단에 설치된 네일과의 교점에서 수직선을 그어 생긴 분할된 요소를 기준으로 해석이 수행된다. 반면에 혼합파괴의 경우에는 보강영역과 무보강 영역과의 경계면과 파괴면과의 교점을 중심으로 요소들을 분할하여 해석을 수행한다. 전체 안전율은 지반의 전단강도에 의한 안전율과 네일의 인장 또는 인발저항력에 대한 국부안전율이 같은 값을 갖도록 가정하여 안전율을 산정하는 방법이다.

독일방법[10]은 파괴면을 두 개의 직선으로 형성된 이선형(bi-linear) 파괴면으로 가정하고, 중력식용벽과 같이 네일로 보강된 영역을 하나의 강성 복합토체로 보아 보강영역밖의 토체를 지지한다고 본다. 전체 안전율은 파괴면과 벽체로 둘러싸인 파괴 흙 썩기의 무게를 고려하여 구한 네일의 인장력과 가상 파괴면 밖에 설치된 네일의 인발저항력의 합에 의하여 산정된다.

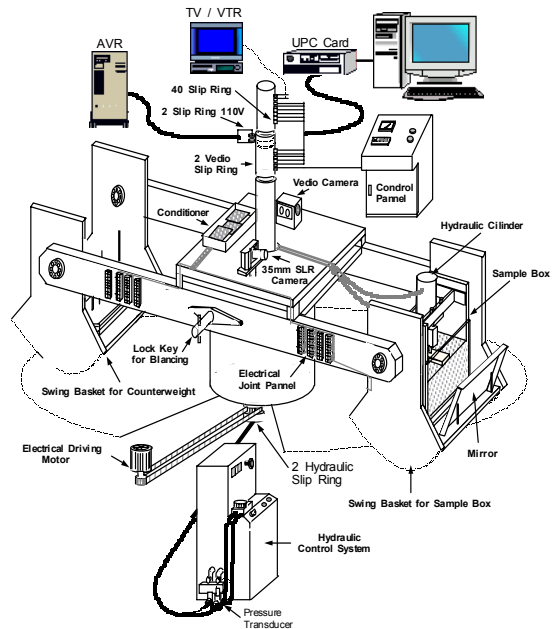
프랑스 방법[8]은 네일로 보강된 토체를 복합재료로 간주하고, 데이비스 방법과 마찬가지로 절편법을 사용하여 원호나 비원호 파괴면에 대하여 모멘트의 평형원리를 바탕으로 사면의 전반적인 안정성을 검토한다. 안정성을

검토할 때, 네일의 인장 저항력뿐만 아니라 전단저항력 및 힘모멘트도 고려하여 파괴기준에 따라 국부 안전율을 검토한 다음 모멘트 평형원리에 의해 전체 안전율을 산정하게 된다.

3. 원심모형실험

모형 구조물의 응력수준을 증가시키기 위해 사용된 원심기[7]는 그림 2에서 보는 바와 같이 원심기의 중심축으로 부터 힌지까지의 거리가 1,000mm 일 때 20gton의 용량을 갖도록 설계되었다.

주요장치는 원심기의 속도를 자동 변속 제어할 수 있는 구동장치, 모형토조 내의 각 계측기로부터 측정되는 데이터를 자동 저장시킬 수 있는 자료획득장치, 실험 중에 모형구조물의 거동을 관찰하는 모니터링 장치 등이 있다.



[그림 2] 원심모형시험 장치

[Fig. 2] A Schematic the Centrifuge in Kangwon National University

3.1 기본물성 및 삼축압축실험

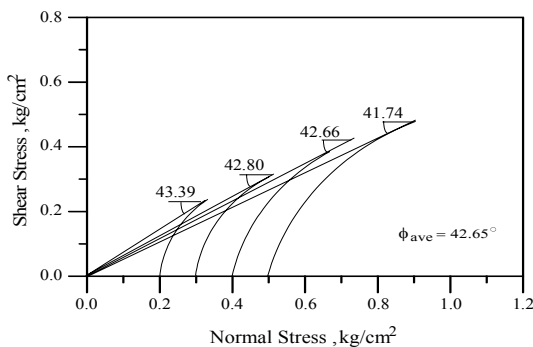
모형지반 조성에 사용된 주문진 표준사는 통일분류법(USCS)으로 SP에 해당하는 균등한 중립질 모래로서 기본 물성치는 표 2와 같다.

[표 2] 기본물성치(주문진표준사)

[Table 2] Basic Soil Properties of Jumunjin Standard Sand

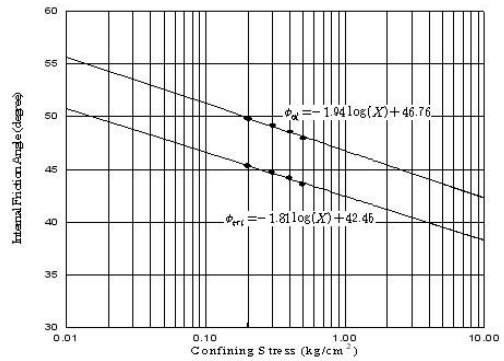
통일 분류법(USCS)	SP
입경특성	$D_{10}=0.21\text{mm}$, $C_u=1.19$, $C_c=1.01$
최대건조밀도	1.682 t/m^3
최소건조밀도	1.384 t/m^3
비중	2.6

한편, 극한해석시 요구되는 흙의 전단강도정수는 배수 삼축압축실험을 실시하였다. 이 시험에서 구속압력은 각각 0.2, 0.3, 0.4, 0.5kg/cm²로 가하여 10분 정도 압밀시킨 후, 간극수압계수를 구하여 완전포화여부를 확인한 다음 축하중을 가해 시료를 전단시키는 압밀배수시험(CD Test)을 실시하였다. 일반적으로 모래를 배수시험으로 전단시킬 경우, 전단속도가 강도특성에 큰 영향을 주지 않으므로 2%/min.의 속도로 축하중을 가하여 공시체를 전단시켰다. 또한, 축방향 변형율이 1% 내지 2%에 도달했을 때 제하(unloading)-재재하(reloading)실험을 실시하였다. 전단실험 중 체적변화의 측정은 압력실과 연결된 뷰렛을 통하여 시료의 팽창과 수축시 물이 배수되는 양을 측정함과 동시에 축하중을 가해주는 피스톤의 관입으로 인한 물의 배수되는 양을 고려하여 실측값에서 보정하였다. 삼축실험 결과를 바탕으로 Mohr-Coulomb의 파괴규준식과 응력경로를 이용하여 구한 결과, 흙의 내부마찰각의 평균값은 42.65°로 나타났다. 특히, 그림 3에서 보는 바와 같이 구속응력이 증가함에 따라 다일러턴시(dilatancy) 영향의 감소로 인해 내부마찰각이 감소하는 것을 알 수 있으며[12], 극한해석시 이를 고려하기 위하여 각각의 구속응력에 대한 Mohr 원을 작도하여 원점과 Mohr원과의 접선을 통해 각 구속응력별 내부마찰각을 산정하여 구속응력에 따른 내부 마찰각의 변화를 나타내는 그림 4의 수식을 구하여 중력수준의 증가에 의한 내부마찰각의 감소효과를 해석시 고려하였다.



[그림 3] Mohr 응력원 (주문진 표준사)

[Fig. 3] Mohr's Circle



[그림 4] 구속응력에 따른 내부마찰각의 변화

[Fig. 4] Variation of internal friction angle with confining pressure

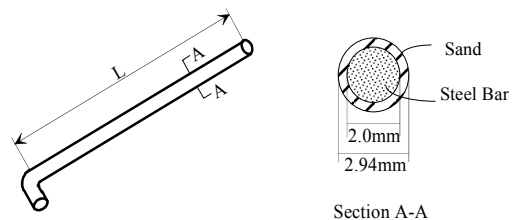
3.2 주 구성요소의 모델링

3.2.1 지반

모형지반의 제원은 모형토조, 전면판의 크기 및 네일의 길이 그리고 원심기의 용량 등을 고려하여 모형지반의 한계높이 및 길이를 각각 15cm, 25cm로 결정한 다음 슬릿 2mm, 낙하높이 75cm의 강사장치를 사용하여 1g 상태에서 모형지반을 조성하였다. 이와 같이 강사법에 의해 조성된 모형지반은 지반의 높이에 상관없이 균질한 밀도 ($=1.613\text{g/cm}^3$)를 갖는 모형지반으로 실험 전과정을 통하여 일관성 있게 유지하였다.

3.2.2 네일 및 전면판

네일은 그림 5에서 보는 것처럼 2mm 직경의 강봉과 동선을 6, 9, 12, 15cm의 길이로 절단한 후 전면판으로부터 네일의 이탈현상을 방지할 목적으로 네일의 단부를 ‘ㄱ’ 형으로 절곡하여 사용하였다.



[그림 5] 모형 네일 형상

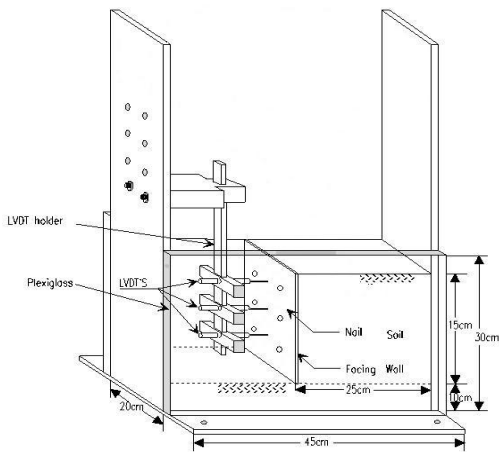
[Fig. 5] A shape of nail

한편, 현장에서 지반과 네일사이에 상호 마찰을 모사하기 위하여 양면 테이프로 네일주변을 피복한 후 그 위에 주문진 표준사를 부착하여 사용함으로써 지반과 네일

사이의 마찰저항력을 인발시험을 통해 구하지 않고 지반 자체의 내부마찰각으로 전단저항력이 발휘된다고 가정하였다. 모형벽체로 사용된 전면판은 두께 0.025mm의 합석판과 2mm의 알루미늄판을 굴착단계별 크기로 절단한 후 소정의 설치간격으로 천공하여 네일을 설치할 수 있도록 한편, 실험 중 측벽을 따라 토사가 유실되는 것을 방지하기 위하여 전면판 측면에 종이테이프를 부착하였다.

3.3 원심모델링

모형토조는 그림 6과 같이 소형의 2차원 평면-변형률 토조(내경: 폭=200mm, 길이=450mm, 높이=300mm)로 모형토조의 좌우측벽 및 후면 그리고 저판은 두께 15mm인 고강도 경량의 알루미늄판으로 제작하고, 토조의 한 측면은 실험중 모형의 거동을 관찰할 수 있도록 20mm 두께의 투명한 plexiglass 판으로 제작하였다.



[그림 6] 모형벽체 및 계측기
[Fig. 6] A Schematic of Model Wall within the Container

먼저 토조의 plexiglass판 안쪽에 OHP 필름상에 그려진 1.5cm 간격의 격자판을 부착하여 실험중 소일 네일링 벽체의 거동에 따른 파괴면 형상을 모니터링할 수 있도록 한 다음 강사장치를 사용하여 토조의 바닥으로부터 10cm까지 기초지반을 포설한 후, 15cm 높이의 전면판과 네일을 소정의 위치에 설치하고 시료를 강사시켜 전면판의 선단부로부터 3cm의 높이가 되면 염색사를 Plexiglass 판 안쪽에 띠(strip) 형태로 포설하여 소일 네일링 구조물의 거동에 따른 활동선 및 파괴메카니즘을 확인할 수 있도록 하였다. 염색사는 모형지반이 완성될 때까지 수직 3cm의 간격으로 연속하여 포설하였다. 이와 같이 완성된 모형구조물을 스윙 바스켓에 안착한 다음 벽체의 수평

이동변위를 측정할 수 있는 3개의 변위 측정기를 모형벽체 앞에 연직 6.5cm 간격으로 설치한 후, 실험중 LVDT 지지대가 힌지부를 중심으로 회전하는 것을 방지하기 위해 보조 지지대를 설치하였다. 또한, 벽체와 LVDT 사이에 가지지대를 설치하여 벽체의 갑작스러운 붕괴로 인한 LVDT의 손상을 방지할 수 있도록 하였다.

원심기를 가속시켜 실험하는 동안에 모형구조물의 파괴 메카니즘 및 그의 거동을 비디오 카메라를 통하여 관찰하는 한편, 비디오 테이프에 녹화하고 모형의 거동 중 중요한 장면을 순간적으로 포착하여 사진 촬영함으로써 실험종료 후 파괴 메카니즘을 확인하는 자료로 활용하였다.

3.4 실험내용

소일 네일링 구조물의 주요 설계변수가 모형벽체의 거동 및 파괴 메카니즘에 미치는 영향을 알아보기 위하여 표 3에서 보는 바와 같이 네일의 수평, 수직간격을 일정하게 유지시킨 후 여러가지 설계변수 즉, 굴착과정, 네일의 길이비 및 설치각, 네일 및 전면판의 강성도 등을 다양하게 변화시키면서 흙의 자중에 의한 원심모형실험을 실시하였다.

[표 2] 자중실험에서 고려된 설계변수들
[Table 2] Geometric and Material parameters

설계변수	고려사항
네일 설치간격 (수평×수직)	(10cm×5cm)
전면판 재질	연성(합석판), 강성(알루미늄판)
네일 재질	연성(동선), 강성(강봉)
네일 설치각	0°, 10°, 20°
굴착깊이(cm)	1단계(5), 2단계(10), 3단계(15)
네일길이(cm)	6, 9, 12, 15

4. 결과해석

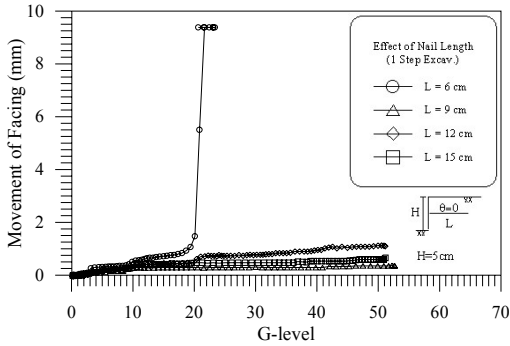
4.1 주요변수의 영향

자중실험에서 제시된 여러 가지 설계변수가 모형구조물의 거동에 미치는 영향을 알아보기 위하여 각각의 굴착단계에 대해 모형벽체 상단부에 설치된 변위계로부터 얻은 횡방향 이동변위를 기준으로 비교하였다.

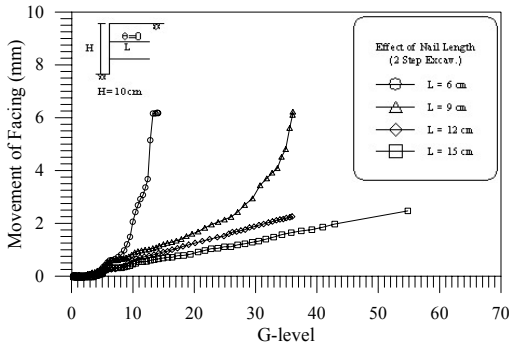
4.1.1 네일 길이 및 설치각에 따른 영향

그림 7-9는 네일의 설치각이 0°이고 굴착깊이가 각각 5cm, 10cm, 15cm일 때, 중력수준에 따른 전면판의 이동변위를 보여준다. 그림에서 네일길이가 증가함에 따라 전

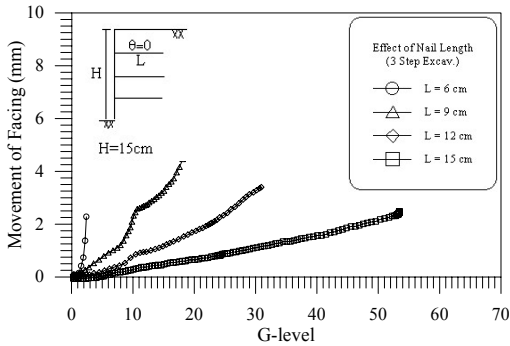
면판의 이동변위가 점점 더 감소함을 알 수 있다.



[그림 7] 1단계 굴착시 네일길이에 따른 영향
[Fig. 7] Effect of nail length (1 step excavation)



[그림 8] 2단계 굴착시 네일길이에 따른 영향
[Fig. 8] Effect of nail length (2 step excavation)

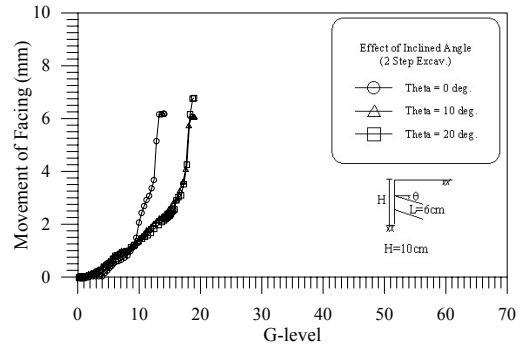


[그림 9] 3단계 굴착시 네일길이에 따른 영향
[Fig. 9] Effect of nail length (3 step excavation)

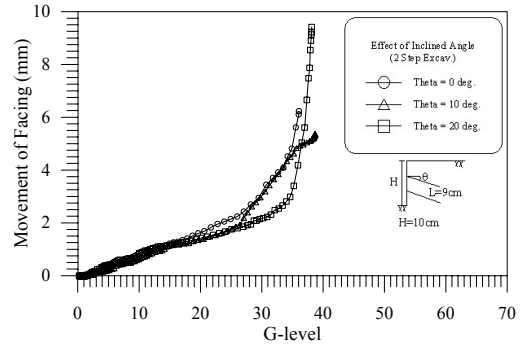
이와 같이 각 그림에서 동일한 굴착깊이에 대해 네일 길이가 증가함에 따라 모형 구조물의 안정성이 점점 더 확보됨을 알 수 있는데, 그 이유는 Rankine의 파괴선을 기준으로 파괴면과 전면판으로 둘러싸인 영역에 작용하는 활동력보다 파괴면 밖의 네일의 유효길이를 따라 유

발되는 저항력이 더 크게 작용하기 때문인 것으로 보인다.

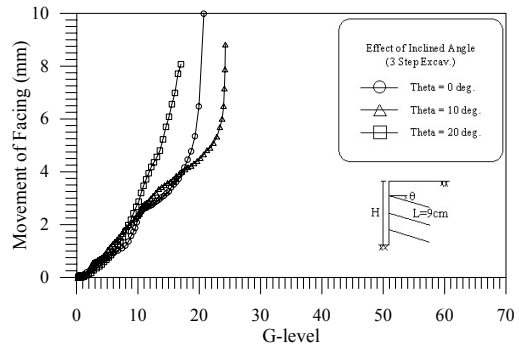
한편, 네일의 설치각에 따른 영향을 알아보기 위하여 2단계 굴착시 네일길이가 각각 6cm, 9cm 그리고 3단계 굴착시 네일길이가 9cm인 경우에 대해 그 설치각을 0, 10, 20°로 변화시키면서 중력수준의 증가에 따른 벽체의 이동변위를 그림 10-12에 도시하였다.



[그림 10] 2단계 굴착시 네일설치각에 따른 영향
[Fig. 10] Effect of inclined angle (L=6cm, 2 step excavation)

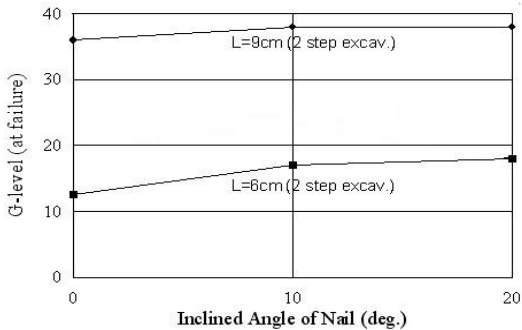


[그림 11] 2단계 굴착시 네일설치각에 따른 영향
[Fig. 11] Effect of inclined angle (L=9cm, 2 step excavation)

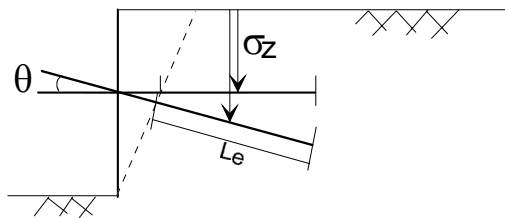


[그림 12] 3단계 굴착시 네일설치각에 따른 영향
[Fig. 12] Effect of inclined angle (3 step excavation)

그림 13은 네일 설치각에 따른 파괴시의 중력수준을 기준으로 살펴본 것으로, 6cm의 네일길이를 갖는 모형에 대해 네일의 설치각이 0°에서는 12.5g, 10° 및 20°인 경우는 17g 내지 18g로 네일을 수평적으로 설치할 때보다 10, 20°의 각도로 기울여 설치했을 때 모형구조물이 더 안정됨을 알 수 있다. 이는 네일의 길이가 9cm인 경우에서도 동일한 현상을 관찰할 수 있는데, 0°인 경우는 36g, 10° 및 20°인 경우, 38g로 나타났다. 이와 같이 네일 설치각이 0°보다 10° 및 20°인 경우, 모형의 안정성이 증가하는 이유는 크게 두가지로 요약할 수 있다. 그림 14에서 보는 바와 같이 동일한 길이의 네일을 수평면에 대해 일정한 각도로 설치할 경우, 파괴면 밖 네일의 유효길이 증가로 인해 네일주변의 마찰 저항력의 증대에 의한 효과로 볼 수 있고 다른 하나는 네일의 유효길이를 따라 작용하는 연직응력이 네일을 수평적으로 설치한 경우보다 증대됨으로서 전단응력을 증가시키는데 따른 영향으로 볼 수 있다.



[그림 13] 네일의 설치각에 따른 영향
(파괴시의 중력수준을 기준으로)
[Fig. 13] Effect of inclined angle (G-level at failure)



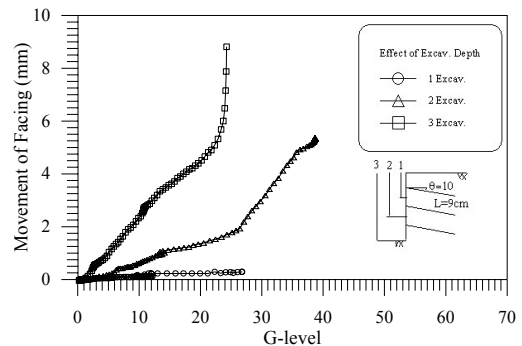
[그림 14] 네일의 설치각에 따른 영향
[Fig. 14] Effect of inclined angle

따라서, 실제 소일네일링 구조물의 시공에 있어서 네일을 수평적으로 설치하기 보다는 수평면에 대해 일정한 각도로 기울여 설치하는게 구조물의 안정성을 더욱 증가시킬 것으로 보인다.

4.1.2 굴착깊이에 따른 영향

그림 15는 굴착깊이에 따른 영향을 도시한 그림으로 네일길이를 9cm로 고정시키고, 네일의 설치각이 각각 10°일 때, 모형벽체의 상단부에서 발생한 횡방향 이동 변위를 중력수준의 증가에 따라 비교하였다.

각 그림에서 보면 굴착깊이가 증가할수록 동일한 중력수준에서 발생하는 전면판의 횡방향 변위가 증가하므로 모형구조물의 안정성이 감소함을 알 수 있는데, 그 이유는 상단에 설치된 네일의 유효길이 감소에 의한 영향으로 판단된다. 즉, 그림 15에서 보듯이 굴착깊이가 깊어질수록 네일의 설치갯수가 증가되어 모형구조물이 더 안정될 것으로 보인다. 그러나, 네일의 길이 및 단위면적당 네일의 보강비가 같다고 할지라도 굴착깊이가 증가할수록 상단에 설치된 네일의 유효길이가 감소함으로 인해 전면판의 횡방향 변위는 증가하고 모형구조물의 안정성은 감소한다. 따라서, 소일네일링 구조물의 안정성에 가장 큰 영향을 미치는 네일은 최상단에 설치된 네일에 의해 지배됨을 알 수 있다.

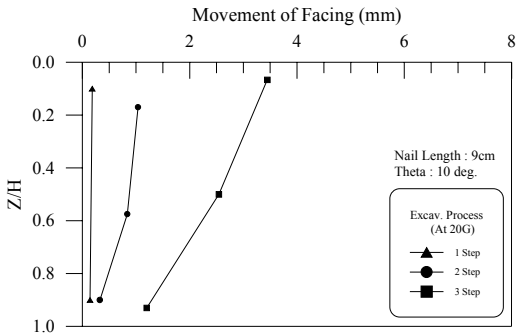


[그림 15] 굴착깊이($\theta = 10^\circ$)에 따른 영향
[Fig. 15] Effect of excavated depth ($\theta = 10^\circ$)

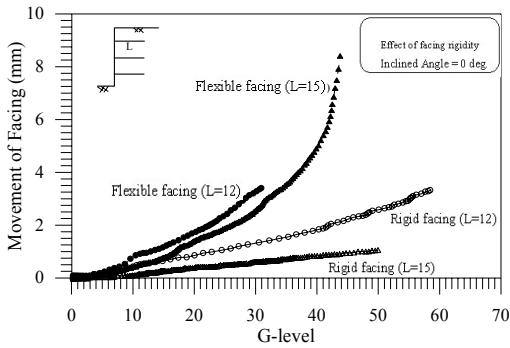
한편, 그림 16은 네일 길이 9cm, 설치각 10°일 때, 벽체 전면에서 설치된 변위계로부터 얻은 횡방향 이동 변위를 굴착깊이에 대하여 무차원화 시키고, 20g의 중력수준에서 발생한 횡방향 이동변위를 중심으로 비교하여 나타내었다. 그림에서도 알 수 있듯이 굴착깊이가 증가할수록 모형벽체의 안정성은 감소함을 볼 수 있다.

4.1.3 벽체의 강성효과

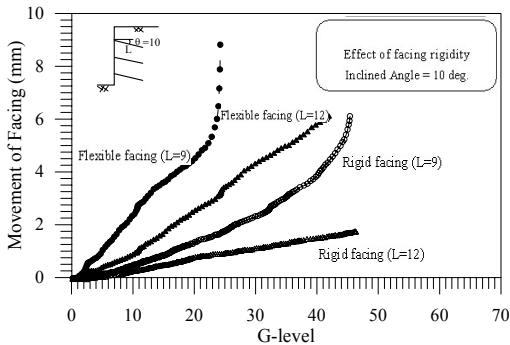
그림 17-18은 전면판의 강성도에 따른 영향을 보여주는 것으로 그림에서 보면 전면판의 재질로 함석판 보다 알루미늄판을 사용했을 때 전면판의 횡방향 변위를 억제시키므로 모형의 안정성은 증가함을 알 수 있다.



[그림 16] 굴착깊이에 따른 영향
(20g에서 발생된 수평변위를 중심으로)
[Fig. 16] Effect of excavated depth
(at 20 G-level)



[그림 17] 전면판의 강성도($\theta = 0$)에 따른 효과
[Fig. 17] Effect of facing wall rigidity on wall movement

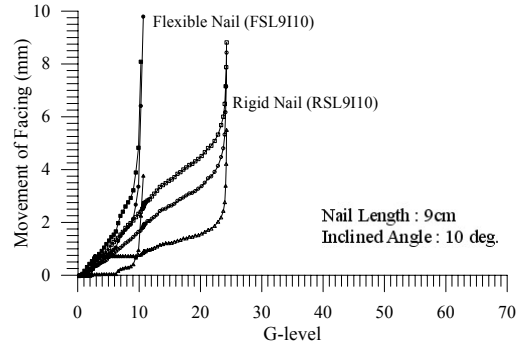


[그림 18] 전면판의 강성도($\theta = 10$)에 따른 효과
[Fig. 18] Effect of facing wall rigidity on wall movement

4.1.4 네일의 강성효과

그림 19에서 RSL9I10 및 FSL9I10은 2열 3층, 네일의 길이 9cm, 설치각 10°로 고정시킨 상태에서 $180\text{kg}/\text{cm}^2$ 의 강도를 갖는 강성네일과 동선을 사용한 연성네일에 대한 비교결과를 보여준다. 그림을 보면 동일한 수평변위

에 대해 측정된 증력수준은 연성네일보다 강성네일인 경우가 증가함을 볼 수 있다. 이와같이 네일의 강성도에 따라 모형 파괴시의 증력수준이 커다란 차이를 보이는데, 그 이유는 네일 전길이에 작용하는 파괴메카니즘이 가상 파괴면을 중심으로 달리 작용하기 때문으로 보인다.

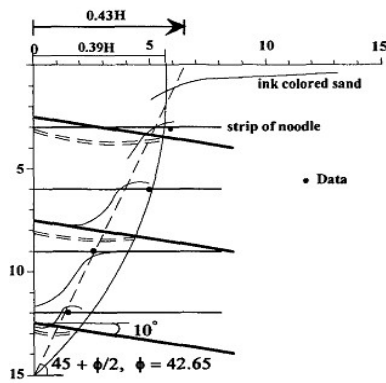


[그림 19] 네일의 강성도에 따른 영향
[Fig. 19] Effect of nail rigidity on wall movement(L=9)

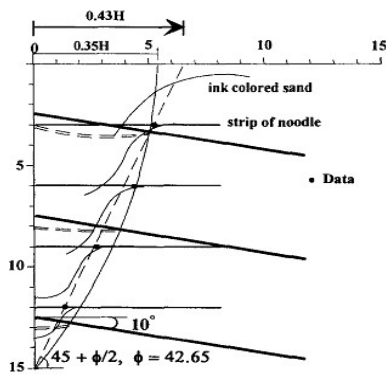
즉, 네일의 강성도와는 상관없이 증력수준의 증가에 따라 네일에 작용하는 구속압력과 주동영역에 작용하는 활동력은 같지만 가상파괴면을 중심으로 네일에 발생하는 전단력 및 수평저항력은 강성네일인 경우는 구속응력의 증가와 더불어 증가하므로 전단저항 효과를 크게 증가시키지만 연성네일인 경우는 그 크기가 강성네일에 비해 상대적으로 매우 작기 때문에 전단저항 효과를 전혀 발휘하지 못하므로 주동영역내에 존재하는 네일길이에서는 서서히 변형을 일으키면서 모형이 파괴됨을 관찰할 수 있다. 따라서 실제 설계상에서는 네일의 강성도에 따라 가상파괴면과 네일의 교점에서 발생하는 전단응력을 적절히 선정해야 할 것으로 판단된다.

4.2 네일의 변형된 형상 및 파괴메카니즘

극한평형 해석시 가상 파괴면의 합리적인 결정을 위해서는 각 층별로 설치된 네일에서 발생하는 최대 인장력 점의 궤적을 조사하는 것은 매우 중요하다. 그러나, 원심 모형실험에 사용된 네일은 그 직경이 2mm로 스트레인 게이지(Strain Gauge)를 네일 표면에 부착하여 인장력을 측정하는 것이 불가능하므로 네일의 재질로 동선을 사용한 모형실험에서 국수가닥을 연직 3cm의 간격으로 수평적으로 설치한 다음 실험종료 후 국수가닥의 절단점 위치를 측정하는 한편, 염색피의 파괴형상 그리고 변형된 네일의 형상을 그림 20에 도시하여 절단점의 궤적을 추정하는 방법을 사용하였다. 사진 1은 3단계 굴착시험에서 관찰된 임계활동면을 보여준다.

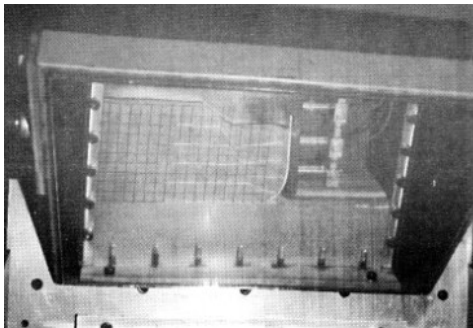


(a) 파괴모드
(네일길이=9cm, 설치각=10°)



(b) 파괴모드
(네일길이=12cm, 설치각=10°)

[그림 20] 파괴형상
[Fig. 20] Failure shape



[사진 1] 실험에서 관찰된 파괴면의 형상
[Photo. 1] failure surface

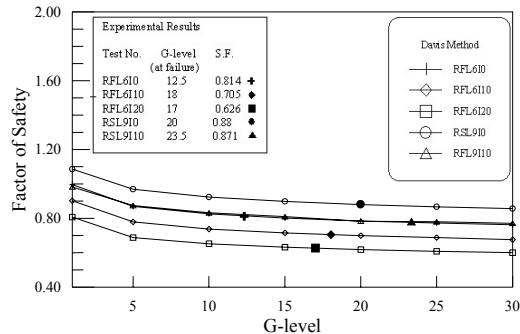
그림 20을 보면 네일의 길이가 9cm인 경우, 염색피의 파괴형상은 Rankine의 파괴면과 일치하지만 네일의 길이가 12cm로 증가함에 따라 Rankine의 파괴면 안쪽으로 이

동함을 관찰할 수 있었다. 한편, 국수가락의 절단점의 위치와 네일의 변형된 형상은 그림에서 보는 바와 같이 대체로 일치함을 보여준다. 국수가락의 절단점 위치를 토대로 절단점의 궤적을 추적한 결과 가상파괴면의 형상은 포물선 또는 대수나선 형태를 보인다. 또한, 절단점의 궤적과 지표면이 만나는 점은 각각의 네일길이에 대해 0.39H, 0.35H, 0.28H로 측정되었고 네일길이가 증가함에 따라 파괴면 안쪽으로 점점 더 이동함을 보여준다. 이를 토대로, Juran 등[4]이 수행한 실험에서 관찰된 결과와 비교해 보면 네일길이가 12cm인 경우는 Juran의 실험결과와 거의 일치하는 것으로 나타났다.

4.3 이론 및 실험치 비교분석

소일네일링 구조물의 해석적 방법으로 현재 주로 사용되고 있는 극한 해석법 즉, 데이비스 방법, 독일 방법, 프랑스 방법 등을 사용해 2장에서 설명한 이론적 근거를 바탕으로 프로그램을 개발하여 자중실험결과에 대한 극한 해석을 실시하였다.

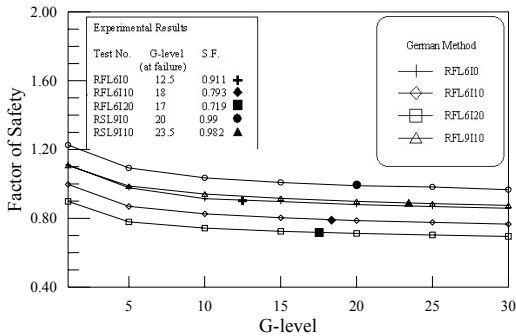
한편, 삼축압축실험에서 구한 흙의 내부마찰각은 구속 응력의 증가에 따라 감소함을 알 수 있으며, 이는 원심모형실험에서 중력수준의 증가에 따라 흙의 내부마찰각이 변화함을 의미한다. 따라서 그림 3에 나타난 함수식을 사용하여 구속응력에 따른 내부마찰각의 변화를 중력수준에 따른 내부마찰각의 변화로 변환시켜 각 모형의 안정성을 검토하였다. 여기서, 중력수준이 1g에서 50g까지 증가하면 흙의 내부마찰각은 약 8°정도 감소한다.



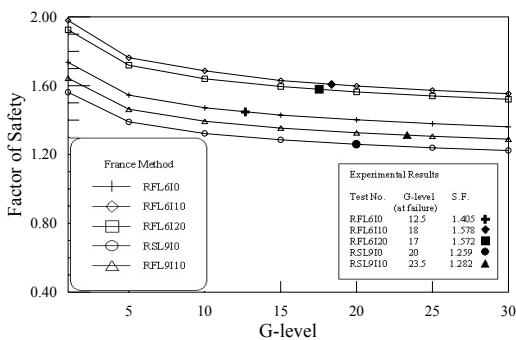
[그림 21] Davis 방법에 의한 안전율 산정
[Fig. 21] Comparison of safe factor from test results with Davis method

그림 21은 데이비스 방법을 사용하여 중력수준의 증가에 따른 안전율을 도시하였다. 그림에서 보는 것처럼 중력수준이 증가함에 따라 안전율이 감소하는 현상을 보이며, 이론적으로는 1g 상태에서 모형은 파괴되는 것

으로 나타났다. 그러나, 그림에서 보는 바와 같이 실험값은 중력수준이 어느 정도 증가해도 모형은 파괴되지 않음을 알 수 있다. 이는 실험적으로 결정된 안전율은 흙과 네일사이의 한계수동 저항력에 도달할 때까지 점진적인 미끄러짐 파괴에 의해서 모형의 파괴가 발생하지만 이론적인 안전율은 네일로 보강된 영역이 정지토압 상태일 때 힘의 평형상태만을 고려했기 때문으로 보인다. 실험값과 이론치를 비교해 보면 데이비스 방법은 약 20%정도 과소평가함을 보인다.



[그림 22] 독일방법에 의한 안전율 산정
[Fig. 22] Comparison of safe factor from test results with German method



[그림 23] 프랑스 방법에 의한 안전율 산정
[Fig. 23] Comparison of safe factor from test results with France method

그림 22는 독일방법에 의한 해석결과로 실험값에 비해 이론치가 약 10% 정도 작게 산정되므로 이 방법 역시 데이비스 방법과 마찬가지로 모형의 안정성을 과소평가함을 보여준다. 그림 23은 프랑스 방법을 사용하여 해석한 결과로 약 40% 정도 모형의 안정성을 과대평가하고 있음을 알 수 있다. 그 이유는 지반의 전단저항력과 네일의 인발저항력은 세가지 방법 모두 고려하지만 네일 양면에서의 지반의 수동저항력은 데이비스 방법과 독일방

법에서는 고려하지 않으나 프랑스 방법에서는 전단과 힘에 대해 고려하는데 기인한다고 본다. 또한 네일의 강도는 데이비스 방법과 독일방법은 인장만 고려하지만 프랑스 방법에서는 인장과 전단 모두 고려한다. 따라서 프랑스 방법이 데이비스 방법이나 독일방법에 비해 안전율이 크게 산정되는 것으로 보인다.

5. 결 론

소일네일링 구조물의 주요 설계변수가 모형벽체의 거동 및 파괴메카니즘에 미치는 영향을 알아보기 위하여 원심모형실험을 통해 소일네일링 구조물에 관한 매개변수적 모형실험을 수행하였다. 이와 같은 원심모형실험 결과를 바탕으로 극한평형법에 의한 기존이론 등과 비교검토함으로써 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 소일네일링 구조물에 관한 매개변수적 원심모형실험을 통하여 소일네일링의 주요 설계인자의 변화(네일의 배열, 길이, 굴착깊이 등)에 따른 영향뿐만 아니라 기존의 극한해석에서 고려되지 않았던 전면판과 네일의 강성도가 모형구조물의 안정성에 매우 큰 영향을 미치고 있음을 확인하였다.
- 2) 실험종료 후 여러 가지 방법에 의해 관찰된 활동선형성의 파괴메카니즘을 분석한 결과 자중실험에서는 대수나선 형태를 나타낸다.
- 3) 원심모형실험의 경우, 중력수준의 변화에 따른 구속응력의 변화에 의해 흙의 다일러턴시 경향 및 내부마찰각의 변화가 소일네일링 구조물의 안정성에 미치는 영향이 큰 것으로 확인되었으며 자중실험에 의한 원심모형실험결과 해석시 그의 영향을 고려하여야 한다.
- 4) 자중실험에 대한 극한해석 결과, 데이비스 방법은 20%, 독일방법은 10%정도 안전율을 과소평가하고 있는 반면에 프랑스 방법은 40%정도 안전율을 과대평가하고 있음을 알 수 있었다. 보다 합리적인 설계법을 제시하기 위해서는 향후 이에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 보인다.

References

[1] Corte, J., F., "Design of Geotechnical Centrifuge", Proc. of the International Conference on Geotechnical Centrifuge Modelling, Paris, 25-27, April, 1988.
[2] Hong Taek Kim, et al, "Design of Cone Nailing System

Applied Permanent Slope", KSCE, Vol 2006 No 10, 2006.

- [3] Juran, I., Baudrand, G., Farrag, K. & Elias, V., "Kinematical Limit Analysis for Design of Soil-Nailed Structures", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 116, No. 1, pp. 54-72, 1990.
- [4] Juran, I., Schlosser, F., Shaffiee, S., Humbert, P. & Guenot, A., "Study of Soil-Bar Interaction in the Technique of Soil Nailing", Proc. of the 8th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering : Improvement of Ground, Helsinki, May 23-26 Vol. 2, pp. 513-516, 1983.
- [5] Ko, H. Y. & Sture, S., "State of Art : Data Reduction and Application for Analytical Modeling" Laboratory Shear Strength of Soil, ASTM, STP 740 ASCE, pp. 329-386, 1981.
- [6] Leung, C. F., Lee, F. H. & Tan, T. S., "Keynote Lecture and VELACS Report", Proc. of the International Conference Centrifuge 94, Singapore/31 August-2 September, 1994.
- [7] Nam Jae Yoo, "Installation of Centrifuge Model Testing Apparatus in the Kangwon National University", KSCE, Vol 1994 No 1, 1994.
- [8] Schlosser, F., "Analogies et differences dans le Comportement et le calcul des Ouvrages de Soutenement en Terre armee et par Clouage du Sol", Annales de L' Institut Technique de Batiment et des Travaux Publiques, No. 148, pp. 26-38, 1983.
- [9] Shen, C. K., Bang, S. & Herrmann, L. R., "Ground Movement Analysis of Earth Support System", ASCE, Vol. 107, GT12, pp. 1610-1624, 1981 a.
- [10] Stocker, M. F., Korber, G. W., Gässler G. & Gudehus G., "Soil Nailing", Int. Conf. on Soil Reinforcement, Paris, France, 2, pp. 469-474, 1979.
- [11] Yang, Y., "Application of computational method for soil-nailing walls", ROCK AND SOIL MECHANICS -WUHAN-, Vol. 30, No. 11., 2009.
- [12] Vesic, A.S., and Clough, G. W., "Behavior of Granular materials under high pressure", Journl. Soil Mech. and Found. Div. ASCE, pp. 661-688, 1968.
- [13] Bang, S., "Analysis and Design of Lateral Earth Support System", Ph. D. Thesis, University of California, Davis, 1979.
- [14] Do Seop Lee, "Stability Analysis and Application of the Post-tensioned Removable Soil Nailing System", pp. 15-22, Hongik University, 2004.
- [15] Joon Seok Kim, "Development of Analysis and Design Method for Nailed Earth Structures by Discrete Element Method", Ph. D Thesis, KAIST, 1996.

김 영 길(Young-Gil Kim)

[정회원]



- 1992년 2월 : 강원대학교 일반대학원 토목공학과 (공학석사)
- 1999년 2월 : 강원대학교 일반대학원 토목공학과 (공학박사)
- 2007년 7월 ~ 현재 : 강원도 지방건설기술 심의위원
- 2000년 3월 ~ 현재 : 한림성심대학교 토목과 교수

<관심분야>

토목공학, 토질및기초