

NDB 쏘일네일링 시스템의 거동특성 평가에 관한 실험적 고찰

An Experimental Study on the Analysis of Behavior Characteristics of the NDB Soil Nailing System

김홍택¹⁾, Hong-Taek Kim, 정성필²⁾, Sung-Pill Jung, 박시삼³⁾, Si-Sam Park,
전경식⁴⁾, Kyung-Sik Jun

¹⁾홍익대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Hongik University

²⁾(주)오륙개발 대표이사, President, O-Ryuk Development Construction, Co., Ltd.

³⁾홍익대학교 토목공학과 박사수료, Ph.D Candidate, Dept. of Civil Engineering, Hongik University

⁴⁾홍익대학교 토목공학과 석사과정, Graduate student, Dept. of Civil Engineering, Hongik University

SYNOPSIS : In this study, a newly modified soil nailing technology called as the NDB(New Down ward Board) soil nailing system is introduced. To improve the trafficability, workability, and economical efficiency, SMC(Sheet Molding Compound) board is adopted instead of using the concrete block facing. The SMC board has a distinct advantage of showing a fine view by directly coating with any kind of environmental photos. Composite material properties of the SMC board and cement grout are distinguished features of the NDB soil nailing system. In the present study, both laboratory tests(bending and punching failure tests) and field pull-out tests are carried out to analyze the behavior characteristics of the NDB soil nailing system, including the stress and strain distribution.

Key words : NDB soil nailing system, SMC board, Field pull-out tests

1. 서론

쏘일네일링 공법은 쏘일네일 보강재를 이용하여 지반자체의 전단강도를 증가시킴으로써 원지반이 주된 지보의 역할을 할 수 있도록 유도하는 개념의 공법이라 할 수 있다. 최근의 도심지 지반굴착 공사에 있어서 인접구조물에 대한 영향을 최소화하기 위해서는 굴착으로 인한 지반의 변형을 최소화하는 것이 중요한 문제이며, 이와 같은 이유로 쏘일네일링 공법을 적용하는 국내 도심지 굴착공사에서는 연성 전면벽체보다는 상대적으로 강성이 큰 강성 전면벽체를 많이 사용하고 있는 실정이다. 또한 절취사면의 안정성을 도모하기 위해서 적용되는 영구 쏘일네일링 공법의 경우, 현재로서는 강성이 큰 표면보호공로서 콘크리트 벽체 및 블록 등을 사용하고 있는 실정이다. 그러나 현재까지 소개되어온 절취사면에 적용되어지는 강성이 큰 표면보호공의 경우, 자연친화적인 미관조성이 다소 어려울 수 있으며, 콘크리트 패널 및 블록 등의 자중에 의해 운반성, 시공성 및 경제성 등이 결여되는 단점이 있다. 따라서, 이러한 문제점 등을 극복하고자 본 연구에서는 SMC(sheet molding compound) 보드 및 시멘트 몰탈(cement mortar) 등을 이용한 NDB(new down ward board) 쏘일네일링 시스템을 개발하였으며, 편칭전단강도시험 등을 토대로 NDB의 재료적 특성을 평가하였다. 또한 NDB 쏘일네일링 시스템을 적용한 쏘일네일링 구조체의 거동특성을 평가하기 위해 수행된 현장인발시험을 토대로, 네일 인발시 SMC 보드 및 네일에 작용되는 응력 및 변형을 분포 등을 살펴보았다. 이를 토대로 향후 NDB 쏘일네일링 시스템에 있어서 예상되는 지반-네일 상호작용을 고려한 모델개발에 필요한 기초적인 자료를 제시하고자 한다.

2. NDB 쏘일네일링 시스템

2.1 개요

본 연구에서 개발한 NDB 쏘일네일링 시스템은 가시설 및 영구 구조물로서 적용 가능한 공법으로, 원지반 절취를 최소화하고 조립식 전면판인 SMC 보드, 시멘트 몰탈 및 쏘일네일 등을 이용하여 원지반 강도를 증진시켜 수평토압에 저항하는 공법이다. NDB 쏘일네일링 시스템은 굴착단면이 최소화되기 때문에 삼림 및 녹지 등의 시공 장소에 미치는 영향이 적고, 비교적 경량인 SMC 재질로 이루어진 SMC 보드를 전면판으로 사용함으로써 콘크리트 패널이나 블록을 전면판으로 사용하는 보강공법에 비해, 운반비감소, 공기단축 및 인력감소 등을 도모할 수 있으며, 필요시 NDB 전면판에 주변 자연경관 또는 지역특성에 어울리는 사진필름 등을 코팅할 수 있다는 장점이 있다. 본 연구에서 개발한 NDB 쏘일네일링 시스템의 단면도는 그림 1과 같으며, 그림 1(a)의 측면도와 같이 SMC 보드 내부에는 격자형 rib를 일정 간격으로 두어 NDB의 내구성을 증진시켰으며, 시멘트 몰탈과 SMC 보드의 부착을 증진시켜주기 위해서 와이어메쉬(wire mesh)를 고정핀으로 SMC 보드에 고정할 수 있도록 하였다(그림 1(c)).

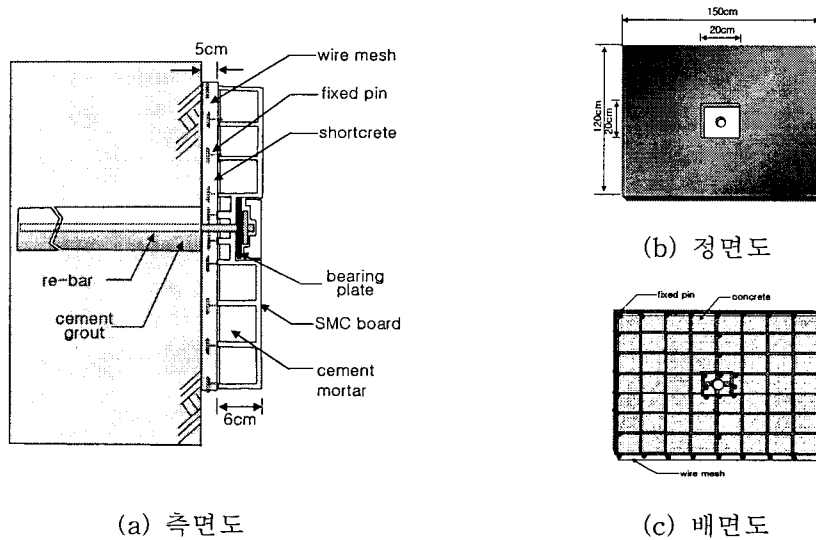


그림 1. NDB 쏘일네일링 시스템

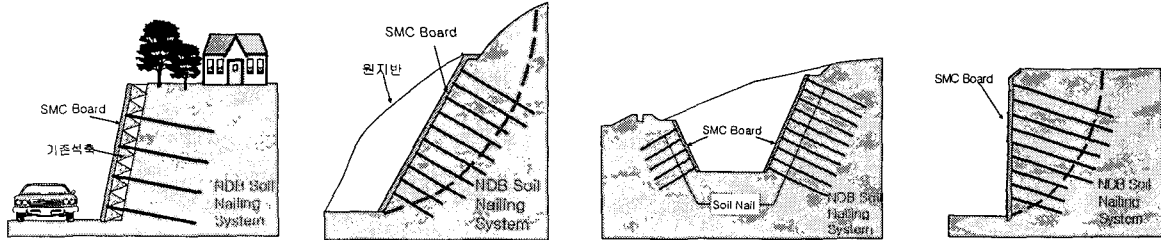
NDB 쏘일네일링 시스템에서 구조적으로 가장 중요한 역할을 하는 SMC 보드의 재료는 생산성 및 성형성이 우수한 첨단 복합소재이고, 열경화 성형재료로서 주로 수작업에 의존해 오던 FRP의 기계적 생산성을 향상시키고 치수안정성을 높이기 위해 개발된 성형재료이다. 또한, SMC 재료는 변형량 및 열팽창계수가 작고, 강성 및 내열성이 우수하다. 아울러, 두꺼운 제품의 성형, 두께 변화가 급격한 제품의 설계가 가능하며, 저압성형이 가능하고, 기계적 강도, 전기적 성능이 우수하며, SMC의 재료적 특성은 표 1과 같다.

표 1. SMC 재료적 특성 (자료제공: Cray Valley Korea)

인장강도 (kg/mm ²)	압축강도 (kg/mm ²)	충격강도 (kg/mm ²)	굴곡강도 (kg/mm ²)	비중	단위중량 (kg/m ³)
7	20	70	20	1.8	4.0~4.5

2.2 NDB 쏘일네일링 시스템을 이용한 사면보강

사면보강에 적용할 수 있는 NDB 쏘일네일링 시스템의 대표적인 적용사례를 도시하면 그림 2와 같으며, NDB 쏘일네일링 시스템이 적용된 현장의 시공후 예상조감도 및 적용은 표 2와 같다.



a) 기존석축의 보강 b) 자연사면의 보강 c) 절토사면의 보강 d) 지하굴착 보강

그림 2. 사면보강에 적용될 NDB 쏘일네일링 시스템의 주요사례

표 2. NDB 쏘일네일링 시스템이 적용된 예상조감도 및 적용

종류	예상조감도	형식	적용
NDB 쏘일네일링 시스템		<ul style="list-style-type: none"> · SMC 보드 + 쏘일네일링 + 필름코팅 	<ul style="list-style-type: none"> · 사면안정공법으로서, NDB + 쏘일네일링 구조체 형성. · 쏘일네일과 SMC 보드가 구조적으로 서로 일체되어 시공.

2.3 NDB 쏘일네일링 시스템의 시공순서

NDB 쏘일네일링 시스템의 시공과정은 근본적으로 굴착하는 동안 지반의 이완을 가능한 억제하며, 원지반이 지닌 재료적 성질 저하를 방지하는데 주목적을 두고 착안되었다. SMC 보드를 전면판으로 사용하는 NDB 쏘일네일링 시스템은 기존의 기성 콘크리트 패널 및 블록 등의 조립식 강성 전면벽체에 비해 경량이기 때문에, 전면벽체 역할을 하는 SMC 보드를 인력으로 설치가 가능하다. 따라서, 기존의 강성 전면벽체시공에 비해 무지보자립시간(stand-up time)을 최소한으로 줄여 응력이완 등에 의한 국부적인 붕괴를 억제할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서 개발한 NDB 쏘일네일링 시스템 시공방법은 굴착시공(top-down 방식)으로서 그림 3과 같이 요약할 수 있다. 먼저, 굴착단계에서의 시공순서는 기존의 기성 콘크리트 조립식 패널 및 블록 등을 활용한 쏘일네일링 공법과 유사하나, SMC 보드를 인력으로 손쉽게 절취부 전면부에 부착할 수 있다는 점 및 SMC 보드 내부에 시멘트 몰탈을 주입함으로써 절취부 전면, SMC 보드 및 보강재(re-bar)가 완전히 부착되어 보다 일체화 될 수 있다는 점 등이 상이하다 할 수 있다.

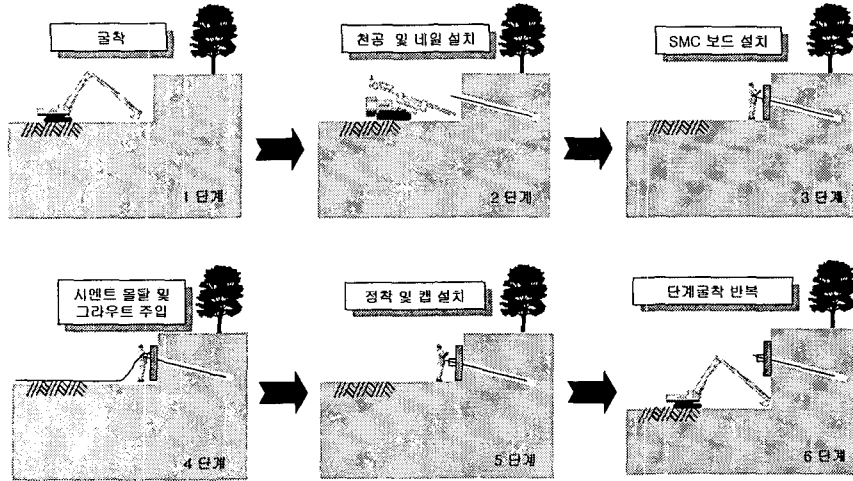


그림 3. NDB 쏘일네일링 시스템 시공순서

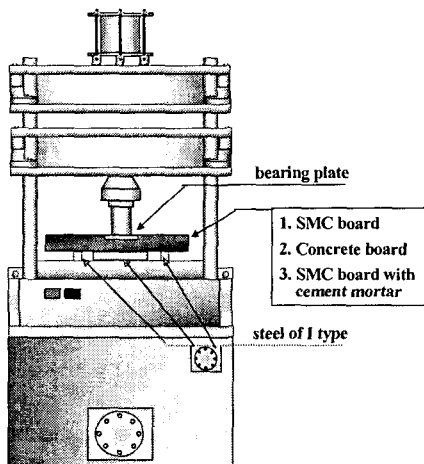
3. 편칭전단강도시험 및 현장인발시험

3.1 편칭전단강도시험 제원 및 방법

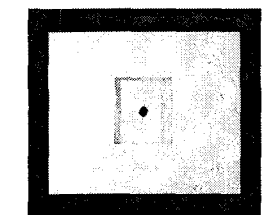
본 시험에서는 만능시험기(UTM)를 사용하였으며, 콘크리트 보드, SMC 보드 및 SMC 보드 내부에 시멘트 몰탈을 충전시킨 경우에 대해서 편칭전단강도시험을 수행하였다. 시험에 사용된 각 시료의 제원은 표 2와 같다. 각 시료의 중앙부에 20cm×20cm의 지압판을 상부에 편칭전단 하중을 2mm/min의 속도로 유지하며 변위제어방식으로 수행하였으며, 이 때 재하판의 국부응력집중으로 인한 파괴를 방지하기 위해 하중이 재하되는 곳으로부터 10cm 거리를 두어 4곳을 I 형강으로 지지하였다(그림 4).

표 2. 실내모형시험 제원

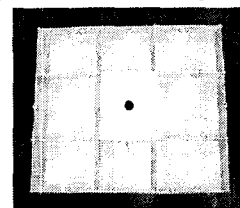
Type	종류	크기	SMC 보드 두께	지압판
1	콘크리트 보드(wire-mesh 보강)	70cm×60cm×6cm	-	20cm×20cm
2	SMC 보드		7mm	
3	SMC 보드 + 시멘트 몰탈		7mm	



(a) 만능시험기(UTM)



(b) SMC 보드 정면도



(c) SMC 보드 배면도

그림 4. 편칭전단강도시험

3.2 현장인발실험 제원 및 방법

본 연구에서 개발한 NDB 쏘일네일링 시스템의 인발거동특성 및 인발시 SMC 보드에 전달되는 응력 변형을 분포 등을 알아보기 위해서 수행된 현장인발시험 장치 개요도는 그림 5와 같으며, 시험제원 및 조건은 표 3과 같다.

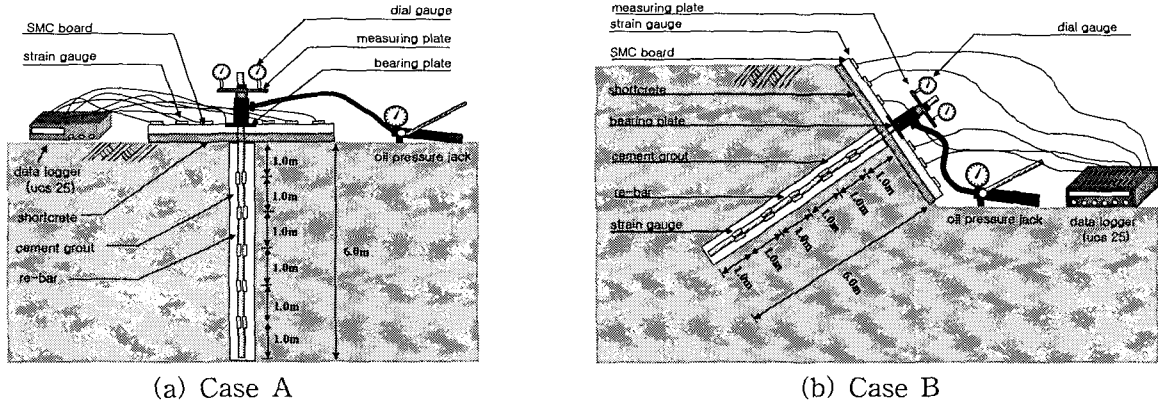
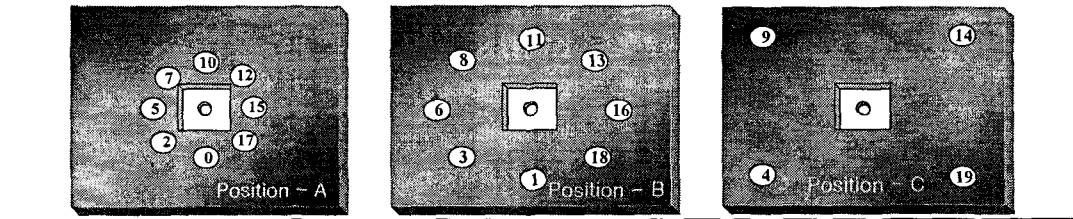


그림 5. 현장인발시험 장치 개요도

표 3. 현장인발실험 제원 및 조건

Case	No.	SMC 보드 두께	네일직경	지압판	SMC 보드 변형율계 부착위치	대상지반
A	1	7mm	25mm	20cm×20cm		풍화암
	2	8mm				
	3	9mm				
B	4	6mm				풍화토

※ 분석시 사용된 변형율계 위치



현장인발시험시 SMC 보드에 부착한 변형율계는 지압판을 중심으로 표 3에 제시된 그림과 같이, 10, 30 및 50cm 거리에 총 20개를 부착하였다. 본 연구에서 변위제어방식 현장인발시험을 수행하였으며, 인발속도는 'Clouterre 연구보고서'에 소개된 변위제어방식의 현장인발시험 방법을 참고하여 1mm/min(허용오차 $\pm 10\%$ 이내) 정도로 하였다. 또한 인발시험은 인발력이 최대치를 지나 점차 감소하는 경향을 나타내거나 일정한 값에 수렴할 경우 종료하였다.

4. 시험결과 분석

4.1 편칭전단강도시험

네일 인발에 따른 편칭파괴에 대한 안정성을 검토하기 위해서 만능시험기(UTM)를 이용하여 편칭전단강도시험을 수행하였으며, 시험결과를 정리하면 표 4와 같다.

표 4. 실내모형시험 종류 및 편칭전단강도시험 결과

Type	종 류	파괴하중(t)
1	콘크리트 보드(wire-mesh 보강)	11.8
2	SMC 보드	3.5
3	SMC 보드 + 시멘트 몰탈	16.0

표 4의 시험결과를 살펴보면, Type 3의 경우가 Type 1의 경우에 비해서 편칭전단강도가 36% 정도 증가하는 것으로 평가되었다.

4.2 인발거동특성

NDB 쏘일네일링 시스템의 경우에 있어서 SMC 보드의 두께에 따른 인발거동특성을 알아보기 위해서 SMC 보드의 두께를 6, 7, 8 및 9mm로 하여 인발시험을 수행하였으며, 이때의 설치네일의 길이는 6m로 하였다.

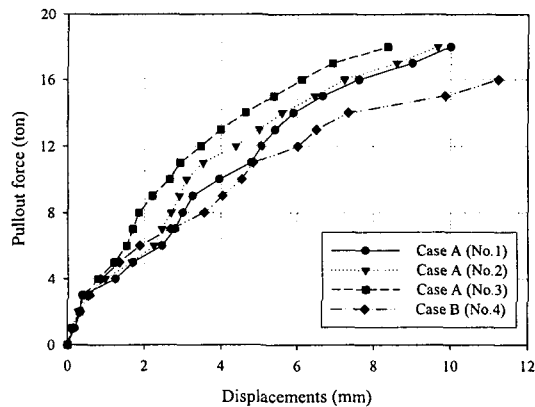


그림 6. 인발거동특성

그림 6의 인발거동특성을 살펴보면 Case A의 경우 SMC 보드의 두께가 증가할수록 인발거동특성이 약간 향상되는 경향을 보였다. 이러한 경향은 인발시 유압재에 의한 반력이 SMC 보드에 전달되어 지중의 구속응력이 증가하여 네일에 작용하는 마찰력이 증가된 것으로 판단된다. 또한 Case B의 경우에는 네일이 수평으로 설치됨에 따라 인발시 유압재에 의한 반력이 네일에 직접적으로 영향을 미치지 않아 Case A 보다는 마찰력이 작게 평가된 것으로 판단된다. 따라서 NDB 쏘일네일링 시스템의 경우, SMC 보드, SMC 보드 내부에 채워진 시멘트 몰탈 및 절취면 등이 완전히 일체화되어 기존의 강성 전면벽체에서 발휘되는 강성을 충분히 발휘하는 것으로 판단된다.

4.3 SMC 보드 두께변화에 따른 변형을

Case A 및 B의 현장인발시험에서 최대인발력이 작용할 경우, SMC 보드에 부착된 변형률계로부터 측정된 변형률값을 3차원 입체적으로 도시하면 그림 7과 같다. 그림 7을 살펴보면, Case A(No.1, 2 및 3)의 경우에는 최대인발력이 발휘될 때 측정된 변형률은 방사형으로 퍼지는 유사한 경향을 나타냈으나, Case B(No.4)의 경우에는 Case A에 비해 인발하중이 가해지는 지압판 부근에서 다소 응력집중 현상이 있는 것으로 나타났다.

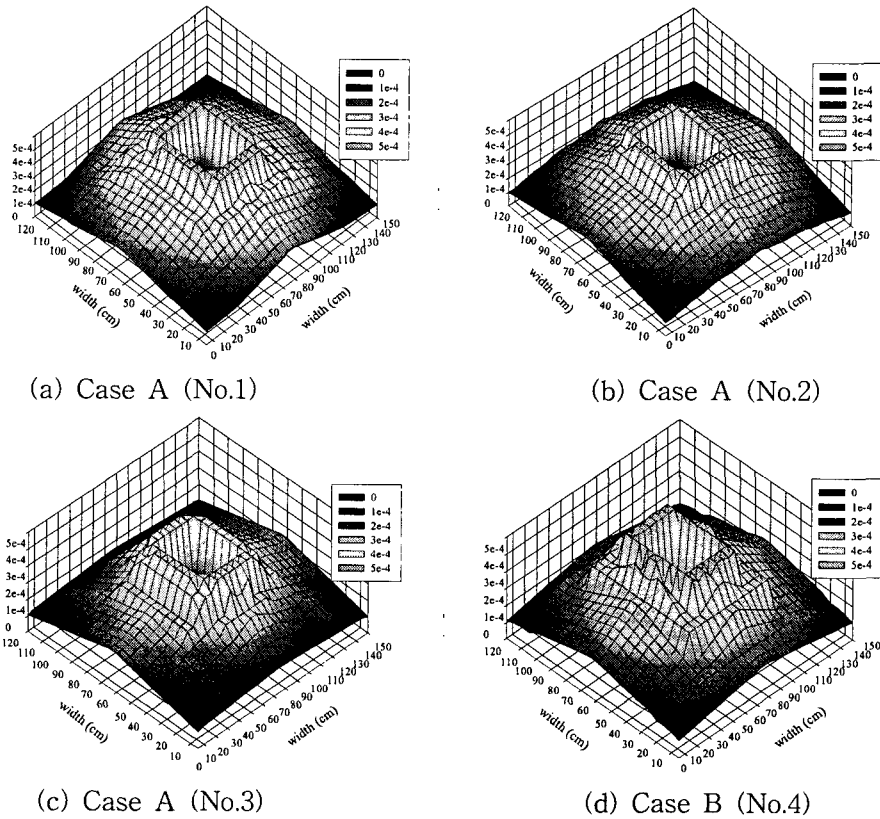


그림 7. SMC 보드에서 발휘되는 변형을 분포

또한, 변형율계 부착위치(표 3 참조)에 따라 총 3개 위치(Position-A, B 및 C)로 분리하여 Case B의 최대인발력(16t)을 기준으로 이때 발휘된 변형을 분포를 SMC 보드의 두께변화에 따라 정리하면 그림 8과 같다.

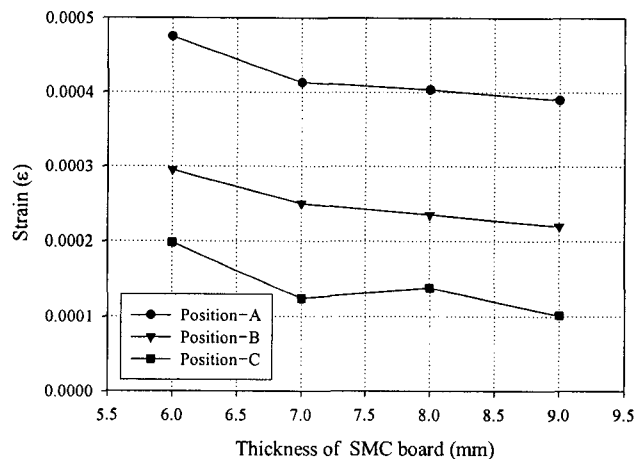


그림 8. SMC 보드 두께변화에 따른 변형을 분포

Case B의 최대인발력(16t)을 기준으로, SMC 보드의 두께가 7mm에서 9mm로 증가함에 따라 발휘되는 변형율은 5~21% 정도로 비교적 미세하게 감소하는 경향으로 나타났으나, SMC 보드의 두께가 6mm에서 9mm로 증가함에 따라 발휘되는 변형율은 21~95% 정도로 크게 감소하는 것으로 나타났다. 그림 7 및 8의 경향은 인발시험시 유압재의 반력에 의한 압축시 SMC 보드의 변형을 분포이나, 실제 사면적

용시의 경우에 있어서 가상과피면을 중심으로 네일 두부쪽에서 압축변형특성을 나타내므로 유사할 것으로 판단된다.

4.4 쏘일네일 길이에 따른 변형특성

NDB 쏘일네일링 시스템의 쏘일네일 길이에 따른 변형특성은 그림 9와 같으며, 그림에서 알 수 있듯이 네일인발시 길이에 따른 철근의 변형정도가 일반 쏘일네일링 시스템과 동일하게 네일 두부에서 최대이고 끝단으로 갈수록 선형적으로 감소하는 것으로 나타났다.

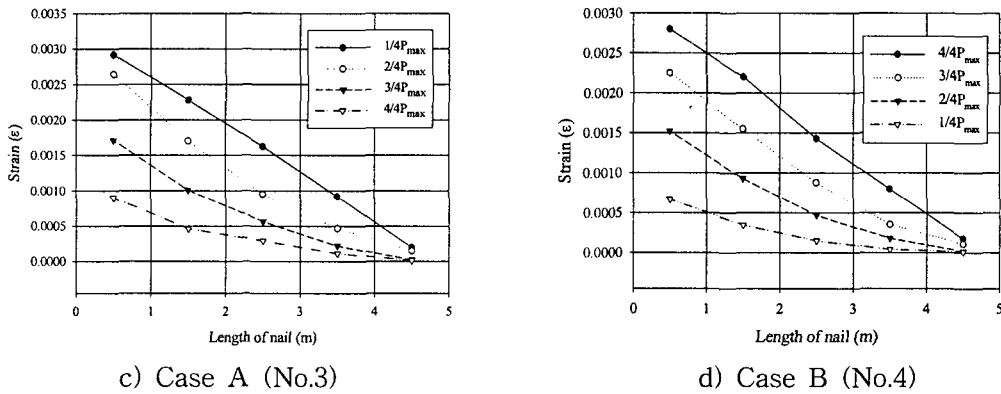


그림 9. 네일에 발휘되는 변형률 및 응력분포

5. 결론

본 연구에서는 기존의 영구 쏘일네일링 시스템에 적용되고 있는 콘크리트 전면벽체 및 블록 등의 단점인 운반성, 시공성 및 경제성 등을 보완하여, SMC(sheet molding compound) 보드 및 시멘트 몰탈(cement mortar) 등을 이용한 NDB(new down ward board) 쏘일네일링 시스템을 개발하였으며, 이상의 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 편칭전단강도시험 결과를 살펴보면, SMC 보드+시멘트 몰탈의 경우가 콘크리트 보드(wire-mesh 보강)의 경우에 비해서 편칭전단강도가 36% 정도 증가하는 것으로 평가되었다.
- 2) NDB 쏘일네일의 현장인발시험결과, 인발거동특성 및 인발시 유압재의 반력에 의한 SMC 보드의 변형특성으로 볼 때 SMC 보드와 내부에 충전된 시멘트 몰탈이 완전히 일체화 되어 강성 전면벽체와 같은 변형거동을 나타내고 있음을 알 수 있었다.
- 3) NDB 쏘일네일링 시스템의 쏘일네일 길이에 따른 변형특성은, 네일인발시 길이에 따른 철근의 변형정도가 일반 쏘일네일링 시스템과 동일하게 네일 두부에서 최대이고 끝단으로 갈수록 선형적으로 감소하는 것으로 나타났다.

참고문헌

1. 김홍택(2001), "Soil Nailing 공법의 과거 현재 미래", 평문각, pp.135~165.
2. FHWA, Manual for Design and Construction Monitoring of Soil Nail Walls, Publication No. FHWA-SA-96_069, pp.63~136.
3. Schlosser, F.(1991), Recommendations Clouterre / Soil Nailing Recommendations, French National Research Project Report, No. FHWA-SA-93_026.