

단계별 굴착시 쏘일네일링 벽체의 변위와 네일의 인장력 분석

Analysis of Tensile Force of Nail and Displacement of Soil Nailed Wall at Stepwise Excavation

전 성 곤*
Jeon, Seong-Kon

Abstract

The displacements of soil nailed wall and the nail tensile force for 11 soil nailing sites were investigated by using measurements obtained from inclinometer and strain gauge.

The maximum horizontal displacement which occurred between 5% and 15% of the final excavation depth was found to be below 0.3% and 0.2% of excavation depth for well and poorly constructed sites.

It was also found that the maximum horizontal displacements for 0.4%, 0.3% and 0.2% of excavation depth occurred when the ratios of nail length to final excavation depth were 0.5, 0.5~0.6 and 0.6~0.7. But the maximum horizontal displacement increased by 0.3% of excavation depth when the ratio was above 0.7. This was probably due to the shallow excavation depth and the deep soil stratum.

The non-dimensional maximum tensile force of nail, K , from ground surface to $0.6H_f$ of the final excavation depth was less than 0.8 and decreased linearly between $0.6H_f$ and the final excavation depth. Also, the maximum tensile force was found to reach up to 60% of the ultimate tensile force at final excavation.

요 지

본 연구는 국내 11 네일링 현장을 대상으로 경사계와 변형률계의 계측자료를 이용하여 쏘일네일링 벽체의 변위와 네일의 인장력을 고찰하였다.

연구결과 최대수평변위량은 시공과정이 양호한 현장의 경우와 불량한 경우 각각 굴착깊이(H)의 0.2%, 0.3%이하로 나타났으며, 벽체의 최대수평변위 발생위치는 지표면으로부터 굴착심도의 약 5~15%이내의 벽체상단에서 발생하였다.

최종굴착깊이(H_f)와 네일의 길이(L)와의 길이비 R이 0.5이하, 0.5~0.6, 0.6~0.7인 경우 최대수평변위가 각각 굴착깊이(H)의 0.4%, 0.3%, 0.2%로 나타났다. 그러나 길이비 R이 0.7이상인 경우에는 최대수평변위가

*정회원. 여주대학 토목과 조교수

굴착깊이의 약0.3%로 증가하는 것으로 나타났으며 이러한 결과는 굴착깊이가 얇고, 토사층 부분이 많았기 때문에 판단된다.

최대인장력을 무차원화한 K값은 지표면으로부터 최종굴착깊이(H_f)의 0.6 H_f 까지는 0.8이하로 나타났으며, 0.6 H_f 에서부터 최종굴착면까지 선형적으로 감소하는 것으로 나타났다. 그리고 최종굴착완료시 네일의 최대 인장력(T_{max})이 네일의 항복인장력(T_{σ_y})에 최대 60%까지 도달하는 것으로 나타났다.

Keyword : Soil nailed wall, Nail, Horizontal displacement, Tensile force, Stepwise excavation

1. 서론

쏘일네일링 공법은 기본적으로 인장응력, 전단 응력, 휨모멘트에 저항할 수 있는 네일(nail)이라 불리우는 보강재를 선형인장력 없이 비교적 촘촘한 간격으로 삽입하여 원지반 자체의 전체적인 전단강도 증대 및 굴착시공중 및 완료후 발생변위를 가능한 억제하고 원지반을 중력식옹벽과 같은 역할을 하도록 함으로써 전체적인 구조물의 안정을 도모하게 된다.

또한, 쏘일네일링 공법은 작업공간의 확보가 용이할 뿐만 아니라 네일의 길이가 어스앵커보다 짧아 인접건물의 지하구조물이 근접하여 있거나 지하 매설물이 위치한 곳에서도 시공이 용이한 장점이 있다.

쏘일네일링 공법에 대한 연구는 외국의 여러학자들에 의하여 모형실험, 현장실험 및 유한요소법을 이용한 수치해석등을 통한 연구가 진행되어 왔다.

해석방법으로는 한계평형해석에 근거를 둔 Schlosser(1982)에 의해 개발된 프랑스방법, Shen(1992)의 Davis방법, Stocker(1979)에 의한 독일방법과 운동학적 한계평형개념을 바탕으로한 Juran방법(1990)등의 연구가 있다.

모형실험과 현장계측을 통한 연구로 Stocker와 Riedinger(1990), Guilloux와 Schlosser(1984), 1986년부터 5년동안 프랑스 국책 연구 과제 Clouterre(1991) 등의 많은 연구가 이루어

졌다.

국내에서는 쏘일네일링 공법이 도입된 이후 점차 확산되어 가고 있는 실정에 있으며, 모형실험을 통하여 쏘일네일링 벽체의 거동을 규명하고자 김등(1994)의 연구가 있고 이론적인 연구로는 김(1995)이 연구한 바가 있다.

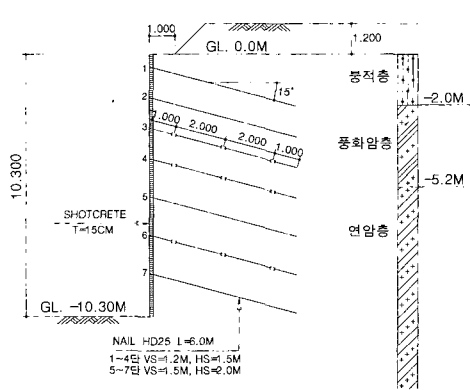
그러나 실제 현장에 있어서 쏘일네일링 벽체의 안정성에 주요인이 되는 벽체변위거동과 벽체 최대수평변위량, 그리고 네일의 인장력에 관한 연구는 아직 미흡한 상태에 있다.

본 연구는 국내 11개 쏘일네일링 현장에 계측기기를 설치하여 측정된 자료를 토대로 굴착에 따른 벽체의 최대수평변위량, 최대수평변위 발생위치 등 벽체의 변위거동 및 네일의 길이와 최대수평변위와의 상관관계를 고찰하고 굴착시 네일에 발생하는 인장력의 거동을 분석하였다.

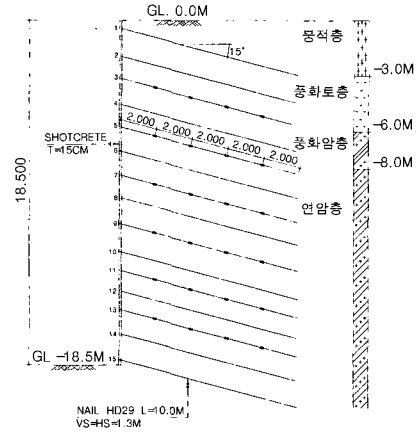
2. 현장조건

2.1 현장개요

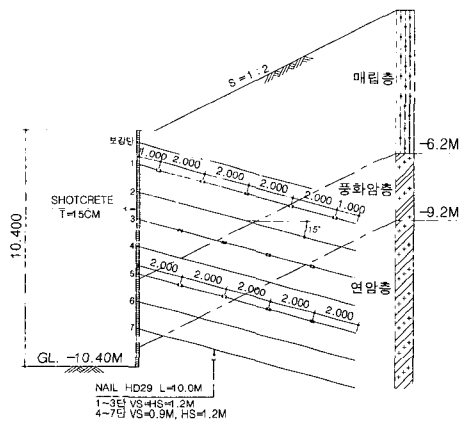
본 연구 대상현장은 쏘일네일링 공법으로 시공된 국내 현장중 11개 현장을 대상으로 선정하였다. 연구 대상현장의 특징은 굴착현장 주변에 인접대지 경계가 근접해 있거나, 지하구조물이 위치하고 있어 어스앵커 시공이 어렵거나 터파기면의 형상이 복잡하고, 부지가 넓어 버팀대 효과의 감



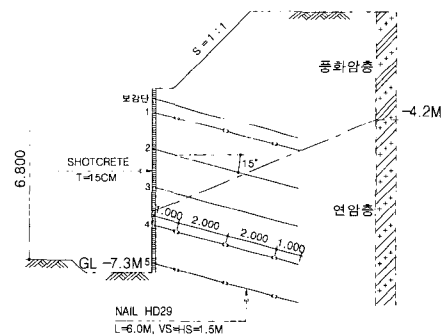
(a) 제1현장 제1단면



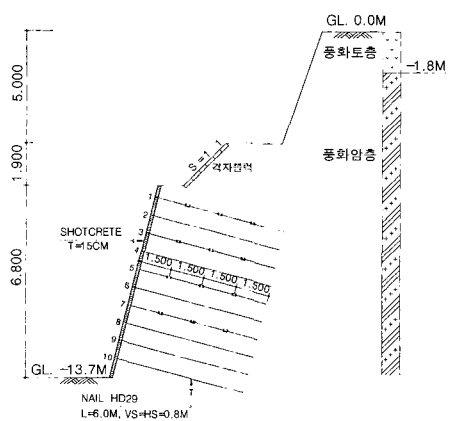
(b) 제1현장 제2단면



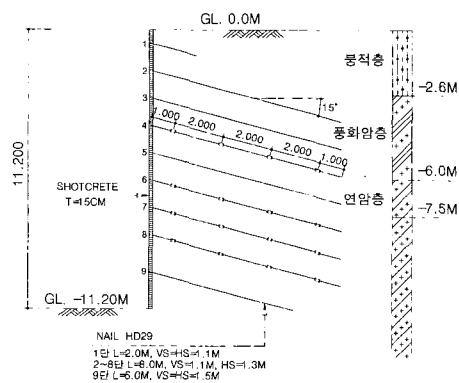
(c) 제2현장 제2단면



(d) 제3현장

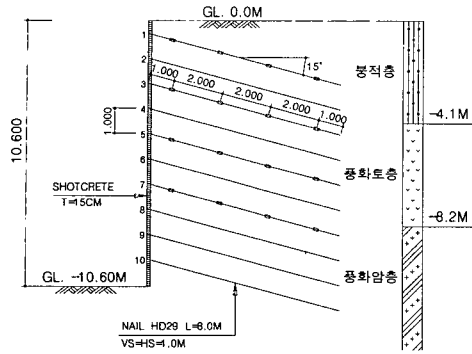


(e) 제4현장

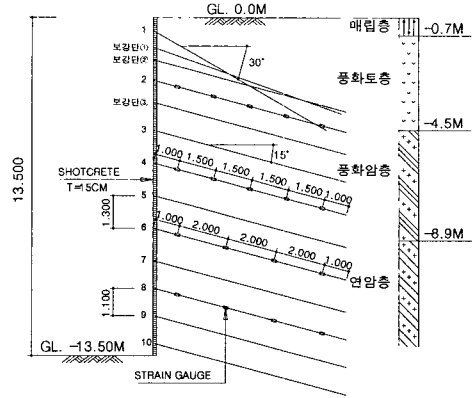


(f) 제5현장

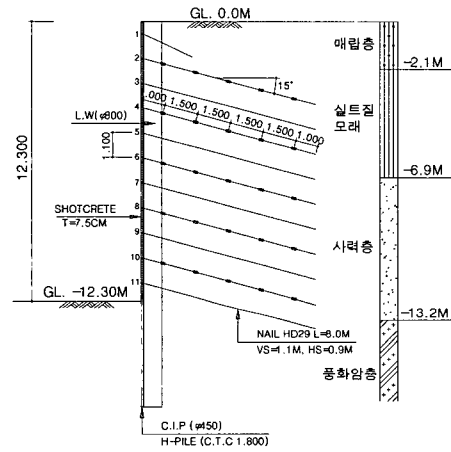
그림1. 각 현장의 단면도 (a~f) (계속)



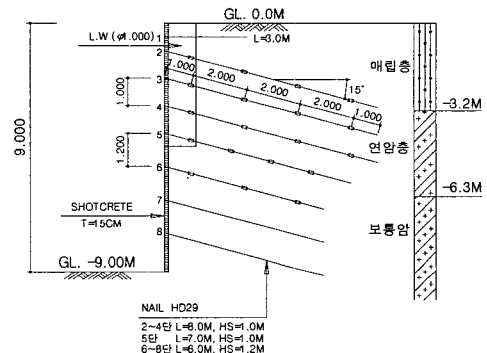
(g) 제6현장 제1단면



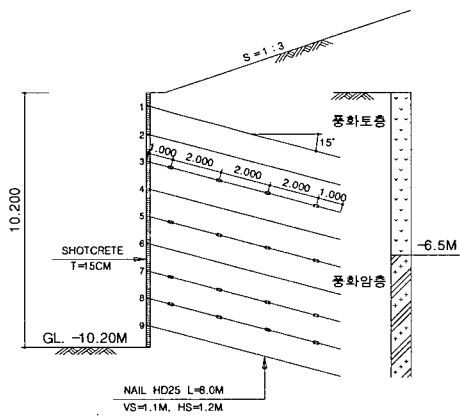
(h) 제7현장



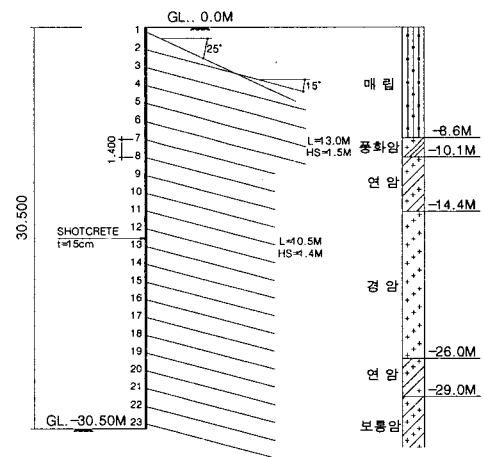
(i) 제8현장



(j) 제9현장 제1단면



(k) 제10현장



(l) 제11현장

그림1. 각 현장의 단면도 (g~l)

표1. 각 현장 지층분포현황과 지반특성

지층 \ 현장	제1현장	제2현장	제3현장	제4현장	제5현장	
매립토 (층두께,m)	자갈 및 실트섞인 모래, 전석함유 (0.4~7.2)	전석 및 모래 혼재 (0.4~3.7)	실트질 모래, 잔자갈 혼재 (0.3~1.4)	실트질 모래, 쓰레기혼재 (0.3~2.9)	전석 및 점성토혼합 (0.8~3.7)	
퇴적토 (층두께,m)	자갈 및 실트섞인 모래 (0.9~7.5)	-	-	실트질 모래 (0.5~3.9)	-	
풍화잔류토 (층두께,m)	자갈 및 실트섞인 모래 (1.0~5.9)	실트질 모래 (1.9~2.4)	모래질 점토 (0.6~2.6)	흑운모 편마 N치14/30~50/21 (1.0~5.2)	입도분포 양호, N치 30~50 (0.5~7.6)	
풍화암 (층두께,m)	(0.4~6.1)	(1.7~9.8)	(0.7~6.5)	(0.1~6.2)	TCR/RQD 4/0~6/0 (1.1~2.2)	
연암 (층두께,m)	(8.0이하)	안산암, 균열절리 발달, TCR/RQD 6/0~41/22 (9.8이하)	균열절리발달 (0.5~2.3)	암내부 일부까지 풍화진행,TCR/RQD 31/0~75/30 (8.6이하)	TCR/RQD 37/9~45/13 (0.5~1.5)	
경암 (지점,m)	-	-	안산암질 응회암 (8.2이하)	-	TCR/RQD 87/85~96/88 (7.5이하)	
지하수위 (m)	G.L-1.05	-	G.L -2.4	G.L -4.6	-	
지층 \ 현장	제6현장	제7현장	제8현장	제9현장	제10현장	제11현장
매립토 (층두께,m)	-	완전풍화토로 암편혼재 (0.0~0.3)	실트질모래,잔자갈 및 전석 혼재 (0.8~3.2)	전석 및 모래섞인 자갈층 (0.5~0.7)	-	모래섞인 자갈, 전석혼재 (8.6~8.8)
퇴적토 (층두께,m)	자갈,전석 및 점토혼재 (5~12)	-	세립질 모래,실트, 모래섞인 자갈 혼재 (10.9~12.1)	-	-	-
풍화잔류토(층 두께,m)	마사질 또는 점토질의 잔류토 (0.0~5.7)	실트질 모래 (1.0~3.7)	-	실트질 모래 (2.3~4.7)	실트질 모래, N치 13~50 (0.0~6.5)	-
풍화암 (층두께,m)	암편 및 연암 맥층 협재 (0.0~2.0)	(0.5~5.3)	(1.5~4.2)	(4.1~6.2)	(6.5이하)	호상 편마암 (1.5~1.6)
연암 (층두께,m)	유문암질 응회암 (9.8이하)	균열절리발, TCR 6.8 (8.9이하)	편마암, 균열절리발달 (17.2이하)	파쇄대 존재 (11.0이하)	-	TCR/RQD 20/0~100/0 (4.0~4.3)
경암 (지점,m)	-	-	-	-	-	TCR/RQD 20/76~100/96 (11.6이하)
지하수위 (m)	-	G.L -9.6	G.L -1.8	G.L -0.7	-	-

표2. 각 현장별 쏘일네일링 벽체의 단면현황

구분 \ 현장	제 1 현 장			제 2 현 장		제3현장	제4현장	제5현장
	제1단면	제2단면	제3단면	제1단면	제2단면			
벽체높이 (H)	10.3m	18.5m	14.5m	8.8m	10.4m	6.8m	8.5m	11.2m
배면지반 형상	평탄 (성토1.2m)	평탄	평탄 (성토6.0m)	사면 1:3	사면 1:2	사면 1:1	사면 1:1	평탄
벽면구성	shotcrete t=15cm	shotcrete t=15cm	shotcrete t=15cm	shotcrete t=15cm	shotcrete t=15cm	shotcrete t=15cm	shotcrete t=15cm	shotcrete t=15cm
천공직경	10cm	10cm	10cm	10cm	10cm	10cm	10cm	10cm
네일재료	철근 HD25mm	철근 HD29mm	철근 HD29mm	철근 HD29mm	철근 HD29mm	철근 HD29mm	철근 HD29mm	철근 HD29mm
네일길이 (ℓ)	6m	10m	10m	8, 10m	10m	6m	6m	6, 8m
길이비 (ℓ/H)	0.58	0.54	0.69	0.91~1.14	0.96	0.88	0.71	0.54~0.71
네일배치 간격(Vs×Hs)	1.2×1.5m 1.5×2.0m	1.3×1.3m	1.2×1.2m	1.2×1.2m	1.2×1.2m 0.9×1.2m	1.5×1.5m	0.8×0.8m	1.1×1.3m 1.5×1.5m
네일설치각도	15°	15°	15°	15°	15°	15°	15°	15°
구분 \ 현장	제 6 현 장		제7현장	제8현장	제 9 현 장		제10현장	제11현장
	제1단면	제2단면			제1단면	제2단면		
벽체높이 (H)	10.6m	11.0m	13.5m	12.3m	9.0m	9.4m	10.2m	30.5m
배면지반형상	평탄	평탄	평탄	평탄	평탄	평탄	사면 1:3	평탄
벽면구성	shotcrete t=15cm	shotcrete t=15cm	shotcrete t=15cm	H-PILE+ CIP+S/C t=7.5cm	LW+S/C t=15cm	shotcrete t=15cm	shotcrete t=15cm	shotcrete t=15cm
천공직경	10cm	10cm	10cm	10cm	10cm	10cm	10cm	10cm
네일재료	철근 HD29mm	철근 HD29mm	철근 HD29mm	철근 HD29mm	철근 HD29mm	철근 HD29mm	철근 HD25mm	철근 HD29mm
네일길이 (ℓ)	8m	8, 13m	8m	8m	6~8m	5m	8m	10.5, 13m
길이비 (ℓ/H)	0.75	0.73~1.18	0.59	0.65	0.67~0.89	0.53	0.78	0.34~0.43
네일배치 간격(Vs×Hs)	1.0×1.0m	1.0×1.0m	1.1×1.0m 1.3×1.0m	1.1×0.9m	1.0×1.0m 1.2×1.2m	1.0×1.0m 1.2×1.2m	1.1×1.2m	1.4×1.5m 1.4×1.4m
네일설치각도	15°	20°	15°	15°	15°	15~25°	15°	15°, 25°

소 및 경제성에 문제가 되는 현장, 그리고 사면에
옹벽 설치시 배면지반의 훼손 영역이 클 경우 등
에 쏘일네일링 공법의 장점이 최대로 이용되었던
현장들로서 대부분 전형적인 도심지 근접시공 현
장이다.

2.2 지반조건

각 현장의 지층구성은 그림1, 표1과 같으며 대
부분 매립토층, 퇴적토층, 풍화산류토층, 풍화암
층, 연암층 및 경암층의 순으로 구성되어 있다.

매립토층은 대부분의 현장에 실트 섞인 모래,
자갈 및 전석등으로 혼재되어 있으나 일부현장에
서는 건축폐자재나 쓰레기등도 혼재되어 있었으
며, 특히 제5현장의 경우 점성토도 혼재되어 있었

표3. 각 현장별 계측기기 설치현황

계측현장	경사계	변형률계	계측현장	경사계	변형률계
제1현장	5개소	66개	제7현장	3개소	32개
제2현장	5개소	31개	제8현장	4개소	30개
제3현장	2개소	9개	제9현장	5개소	12개
제4현장	2개소	24개	제10현장	2개소	32개
제5현장	2개소	32개	제11현장	4개소	16개
제6현장	3개소	56개			

다. 퇴적토층은 대부분 실트질 모래가 주종을 이루나 제6현장과 같이 자갈, 전석 및 점토도 혼재되어 있는 경우도 있었으며, 제1현장, 제6현장 및 제8현장의 경우 층두께가 최대 약12m까지 상당히 두껍게 분포하고 있었다. 풍화잔류토층은 대부분 실트질 모래이며 제4현장의 경우는 흑운모 편마암의 풍화잔류토였으며 제6현장은 점토질 잔류토였다. 지표에서 풍화잔류토층까지의 토사층은 제3현장과 제6현장의 일부를 제외하면 대부분 사질토로 구분될 수 있다.

그리고 풍화잔류토층 하부에는 풍화암, 연암 및 경암순으로 암층이 분포되어 있었으며, 풍화암층은 제6현장의 경우 연암 맥층이 협재되어 있음이 특이하고, 연암층은 대부분 균열과 절리가 발달되어 있었고 제9현장의 경우 파쇄대가 존재하였다.

2.3 쓰일네일링 벽체의 시공개요와 단면현황

네일링 시공은 단계별로 크게 굴착, 전면판, 네일 설치등으로 구분할 수 있는데 본 연구에서 검토된 현장의 시공단계를 살펴보면 굴착은 단계별로 네일 설치위치에서 약 50cm 하부까지 소단없이 굴착하거나 2m~5m 정도의 소단을 설치하며 굴착하였다.

전면판은 대부분의 현장에 와이어메쉬를 포함한 슛크리트($t=15\text{cm}$)만을 사용하였으나, 제8

현장과 제9현장 단면1은 벽체보강 및 차수목적으로 각각 H-PILE+C.I.P+L.W와 LW+S/C로 굴착면 하부까지 시공하였고 단계별 굴착중 슛크리트($t=10\text{cm}$)를 타설하여 벽체 형식에서 타현장과 구분된다.

네일은 HD-25mm 또는 HD-29mm의 표준이형철근을 사용하였으며 설치각도는 수평에서 15~25°도로 하향설치를 기준하고 배면에 지장물이 있을시 각도를 조정하여 설치하였다. (표2. 참조)

천공직경은 10cm로 천공하였으며, 네일과 지반과의 일체화를 위하여 천공구멍 내부는 $\sigma_{ck}=210\text{kg/cm}^2$ 정도의 그라우트로 채웠으며 또한, 굴착전 지하수 위치에 관계없이 굴착면에 배수공을 $6\text{m}^2\sim 8\text{m}^2$ 당 1개소씩 설치하였다.

2.4 계측기기 설치 현황

일반적인 흙막이 벽체에서와 마찬가지로 쓰일네일링 벽체 시공시에도 벽체의 안정과 인접구조물의 피해 여부를 판단하기 위하여 지중경사계, 변형률계, 지하수위계, 지표침하계 등의 계측기가 설치되며 일주일에 약 2~3회 정도의 계측을 실시한다.

본 연구 대상현장에 설치된 많은 수의 계측기기(경사계, 변형률계)중 시공상의 부주의와 계측기기 자체의 불안정으로 인하여 공사도중 일부가 파손되거나 측정 불가능한 것은 제외하였으며, 경사계는 벽체 배면으로부터 1m정도 이격시켜 최대 굴착깊이보다 약 2.0m~4.0m 정도 깊이 설치하여 굴착진행시 벽체의 수평변위를 측정하였는데 측정간격은 0.5m~1.0m, 측정빈도는 주 2~3회를 기준으로 측정하고 굴착 단계마다 최소 1회이상 실시하였다.

본 연구대상 현장에서 사용한 변형률계는 진동현Type(Vibrating Wire Type : geokon VK-4100)이며 네일(이형철근)표면에 부착하여 굴착

시 벽체 수평변위에 의해 발생하는 네일의 축력을 측정하기 위한 것이다. 변형률계 설치는 계획된 네일단마다 네일 길이방향으로 1.5m~2.0m 간격으로 1개씩 설치하였으며, 표면부착방법은 네일 표면을 평탄하게 처리(grinding)하여 용접 부착하였다.

3. 현장계측결과

본 연구 대상 현장에는 지중경사계, 지하수위계, 건물경사계, 지표침하계, 변형률계 등의 계측기를 현장에 설치, 계측하였으며 11개 현장 16개 단면에 대한 지중경사계(inclinometer)와 변형률계(strain gauge)의 계측자료만을 참고하였다.

계측기기중 지표침하계는 몇몇 연구대상 현장에 설치하였으나 현장이 도심지 근접시공 현장이어서 공사중 손상 또는 망실되어 분석할 수 없었으며, 지하수위는 시공시 배수공의 설치로 굴착과 더불어 저하시키기 때문에 고려하지 않았다.

3.1 벽체의 수평변위

본 연구대상 현장 단면중 대표적으로 6개 현장의 굴착단계별 벽체의 수평변위를 그림2에 나타내었다.

각 현장에 대하여 벽체의 수평변위 측정 결과를 분석하면 벽체변위의 형상은 지층 및 벽체 구성 형식에 따라 약간의 차이는 있으나 제8현장의 경우를 제외하고 대부분 벽체 상단에서 최대 수평변위가 발생하는 것으로 나타났고 벽체의 변위형상은 거의 직선과 같은 형태를 보이고 있다.

제1현장 제2단면의 경우 최종굴착깊이(18.5m)에 비해 벽체의 최대변위발생량(18mm)이 적을 뿐만아니라 굴착중 급격한 변위의 증가가 없는 상당히 양호한 계측결과를 나타내고 있으며, 제2현장과 제11현장의 계측결과 최대변위 발생지점이

벽체 상부에서 굴착초기부터 발생하여 최종굴착시까지 그대로 유지하는 전형적인 쏘일네일링 벽체 거동을 나타내었고, 최종굴착깊이는 각각 10.4m, 30.5m이고 최대수평변위는 18mm, 63mm로 나타났다.

한편, 제5현장은 굴착깊이 4.5m 부근에서 변위형태가 불규칙한 것은 경사계의 부분적인 손상 때문인 것으로 판단되며, 최종굴착깊이는 11.2m이고 벽체 최대수평변위 발생량은 33mm로 나타났다. 제7현장은 굴착깊이(13.5m)에 비해 상당히 많은 벽체 수평변위증가량(최종굴착시 약 50mm)을 나타내고 있으며, 이는 본 현장의 토사층 부분이 실트질 모래층으로 굴착시 지반강도가 약한 상태이고 배면 네일의 그라우트의 구근이 완전히 형성되지 못한 상태에서 굴착이 진행됨에 따라 상부층 네일의 변위억제효과가 감소되었기 때문에 각 굴착면 부근에서 벽체변위가 급격히 진행된 것으로 판단된다. 본 현장은 과도한 벽체변위 증가로 인하여 그림1의 (h)와 같이 상부에 보강 네일을 2단 추가 시공한 후 굴착을 진행하였다.

그리고 제8현장의 경우 일반적인 네일보강 벽체의 거동양상과는 달리 포물선 형태의 변형을 나타내고 있으며, 또한 본 현장 지층이 약한 실트층과 점착력이 없는 모래자갈층이 주로 분포된 상태에서 최종굴착시(12.85m) 예상보다 적은 량의 벽체변위(약20mm)가 발생된 것은 타 현장과 달리 굴착벽면에 H-Pile+C.I.P+LW로 보강한 후 굴착하였기 때문에 변위량을 최소화할 수 있었던 것으로 판단된다.

3.2 네일의 인장력

쏘일네일링 벽체의 내적 안정성과 네일재의 안정성을 파악하기 위하여 네일 표면에 변형률계를 부착하여 네일의 인장력변화를 측정하였으며 계측결과는 그림3과 같다.

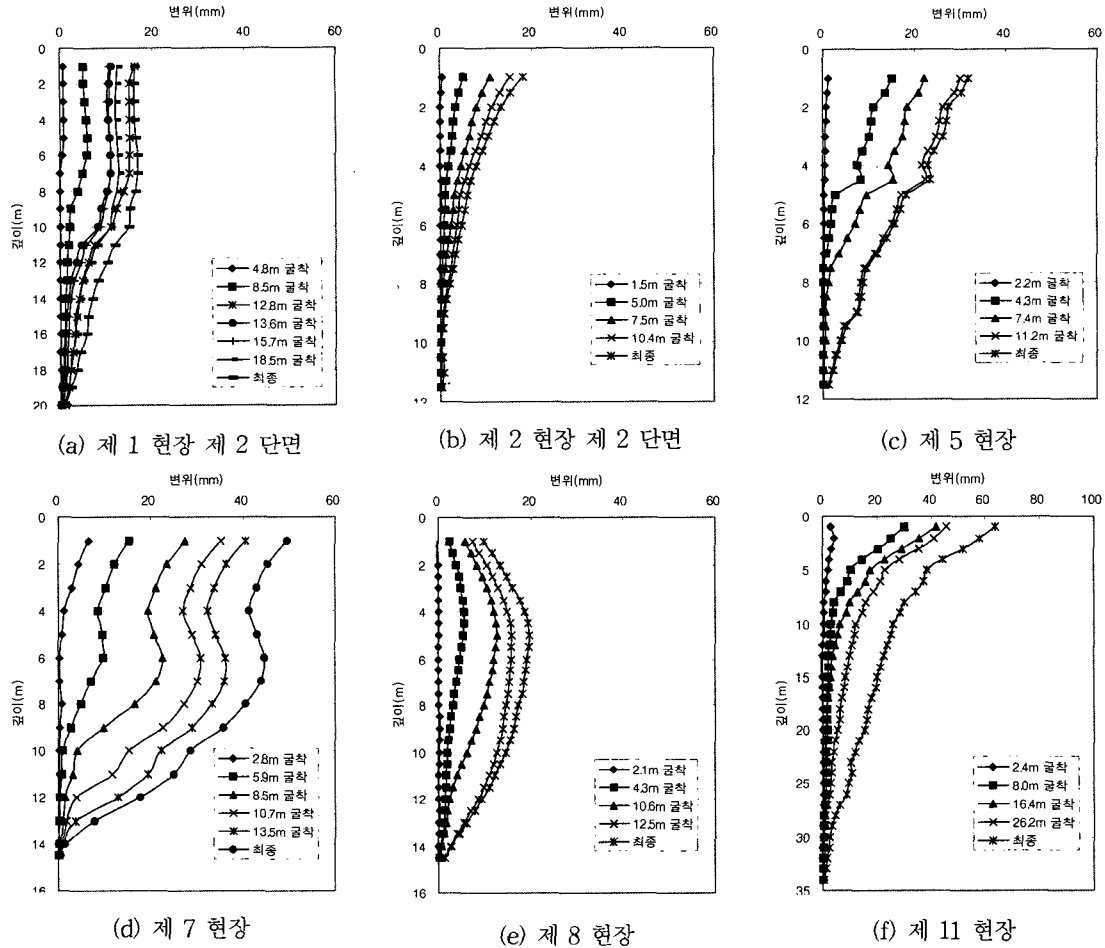


그림 2. 각 현장의 굴착단계별 벽체의 수평변위

네일에 작용하는 축방향 인장력은 이형철근의 단면적과 계측된 이형철근의 변형률로부터 식(1)과 같이 구하였다.

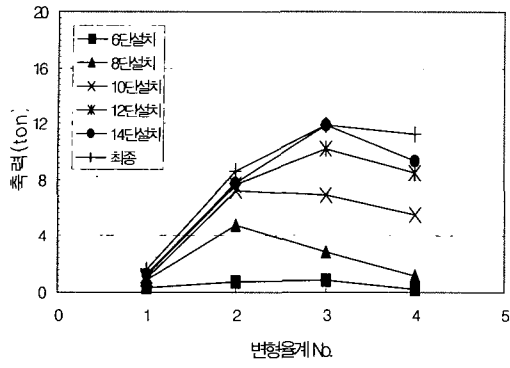
$$\begin{aligned} \sigma &= E \cdot \varepsilon \\ T &= A \cdot \sigma \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, ε : 네일의 변형률
 E : 네일의 탄성계수
 σ : 응력
 T : 네일의 축방향 인장력
 A : 네일의 단면적

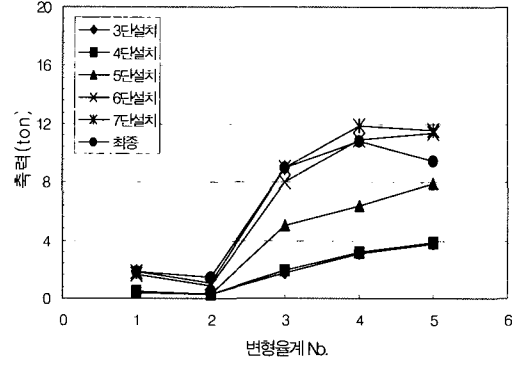
각 현장 단면에 설치된 네일에 다수의 변형률계를 부착하여 계측하였으나 설치시 오류와 시공부주의 등에 의해 파손 또는 손상된 계측기기도 발생하였다.

제1현장 제2단면의 네일 인장력변화는 굴착과 더불어 증가를 보였으나 최종굴착완료시에는 약간 감소하는 경향을 나타내었으며 변형률계 1번, 즉 벽면측 변형률계의 증가폭이 작았을 뿐만 아니라 인장력도 약 1.7ton으로 아주 작게 나타났다.

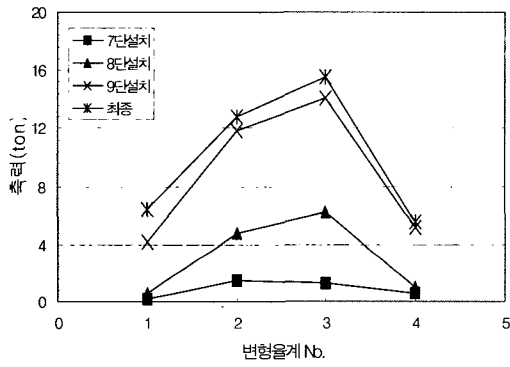
제2현장의 경우는 굴착초기부터 굴착배면측 네일의 끝에서 최대인장력이 발생하였고 굴착과



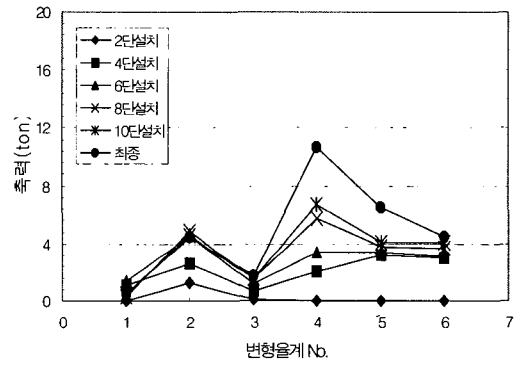
(a) 제 1 현장 제 2단면 (5단 네일)



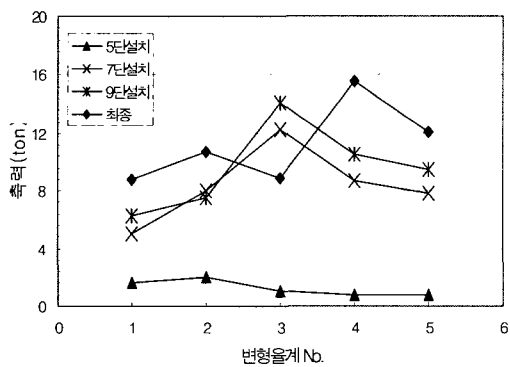
(b) 제 2 현장 (1단 네일)



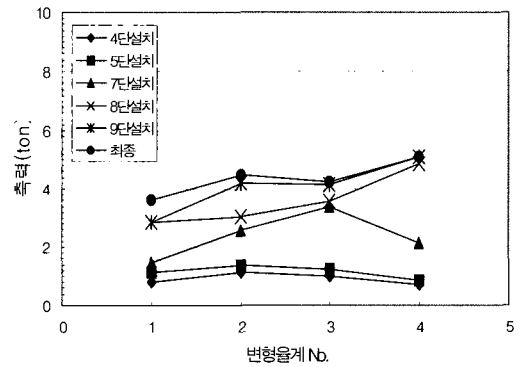
(c) 제 5 현장 (6단 네일)



(d) 제 6 현장 제 2 단면 (1단 네일)



(e) 제 7 현장 (4단 네일)



(f) 제 10 현장 (3단 네일)

그림3. 각 현장의 굴착단계별 네일의 축력변화

더불어 네일의 인장력이 점진적으로 증가하다가 굴착완료시에는 인장력이 약2ton정도 감소한 것으로 나타났으며 이는 네일 설치후 시간의 증가에 따라 지반이 안정되었기 때문에 나타난 현상으로 판단된다. 또한 변형률계 2번의 계측결과로 보아 설치시 약간의 오류가 있었던 것으로 판단된다.

제5현장은 굴착과 더불어 네일의 인장력이 증가하는 경향은 타 현장과 같으나 8단 굴착시와 9단 굴착시의 인장력 증가량이 약8ton에 이르고 있고 최종굴착시 최대인장력이 약16ton까지 나타났으며 이 결과를 그림2의 (c)와 같이 수평변위 계측결과와 연관하여 분석할때 7단 굴착이후 지반이 안정화되기 전에 조기 굴착한 결과인 것으로 판단된다.

제6현장의 경우 제2번과 제4번 변형률계를 통한 네일의 인장력 변화를 감안하면 제3번 변형률계는 설치시 문제가 있었던 것으로 판단되고 변형률계 4번 지점에서 타지점의 변형률계 계측결과보다 시공중 인장력의 증가량이 크게 나타났으며 최종굴착완료시에 약 11ton으로 나타났다.

제7현장은 네일의 최대인장력 발생지점이 굴착과 더불어 배면으로 이동하는 거동을 보였으며 5단 굴착이후 7단 굴착시까지 약 10ton의 네일 인장력 증가량을 나타내고 있으며 이는 그림2의 (d)와 같이 수평변위 계측결과와 연관하여 분석하면 지반강도가 약한상태에서 배면 네일의 그라우트 강도가 조기에 발휘되지 못한 상태에서 굴착이 진행되었기 때문으로 판단된다.

제10현장은 제1현장 단면2와 유사한 거동을 나타내고 있으며 최종굴착시 최대인장력이 약 5.1ton으로 타 현장과 달리 작게 나타났으며 이는 굴착과 네일의 시공과정이 상당히 양호하였기 때문인 것으로 판단된다.

또한 제6현장을 제외한 제1현장, 제2현장, 제7현장 및 제10현장의 네일 인장력의 변화 형태는 굴착이 진행됨에 따라 굴착 벽면으로부터 굴착배

면측으로 갈수록 인장력증가폭이 커지며, 최대인장력발생지점도 굴착배면측으로 이동하는 결과를 보이고 있다. 또한 굴착이 진행되면서 상부 네일 및 벽체 전면의 네일인장력 증가폭은 상대적으로 작게 나타났다. 이러한 원인은 굴착이 진행되면서 가상 활동파괴면이 벽체 배면측으로 이동하면서 활동면 안쪽의 토체가 하나의 블록과 같은 형태로 움직이고 있는 결과로 판단된다.

4. 결과분석

본 연구는 국내 11개 현장 16개 단면에 대한 경사계와 변형률계의 계측자료를 이용하여 굴착단계별 최대수평변위량과 최대수평변위 발생지점등 벽체의 변위거동과 굴착시 네일에 작용하는 인장력의 거동을 분석하였다.

4.1 벽체의 최대수평변위

4.1.1 굴착단계별 최대수평변위

11개현장에서 각 굴착단계별 굴착깊이에 대한 최대수평변위량을 표시하면 그림4와 같으며, 굴착깊이가 깊어질수록 벽체의 최대수평변위량은 증가하고 있으며, 지층이나 현장조건에 따라 변위량의 차이는 약간 있으나 굴착깊이와 최대수평변위량의 상관관계에서 최대수평변위량은 굴착과 네일의 시공과정이 양호한 현장의 경우 굴착깊이(H)의 0.2% 이하로 나타났으며, 또한 지반조건이나 굴착과 네일의 시공이 불량한 현장의 경우는 수평변위가 굴착깊이의 0.3%까지 나타났다. 그리고, 굴착벽면에 H-Pile+C.I.P+L.W로 보강한 제8현장의 경우는 그림4에서와 같이 굴착깊이의 0.2%이하로 나타났다.

이상의 결과를 Stocker와 Riedinger(1990)의 굴착깊이의 약0.1~0.36%와 Guillox와 Schlosser

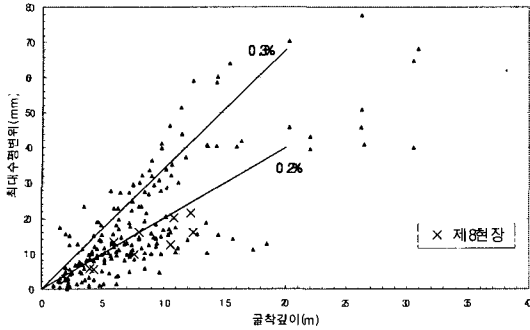


그림4. 굴착단계별 굴착깊이와 최대수평변위

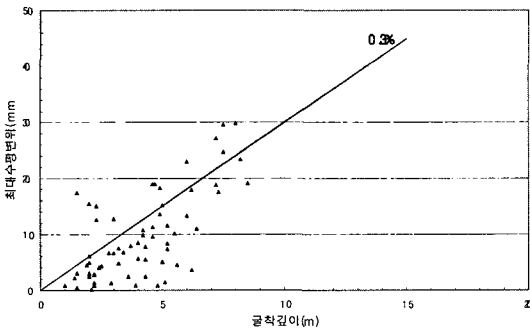


그림5. 토사층에서의 굴착단계별 굴착깊이와 최대수평변위

(1984)의 0.3%의 결과와 비교하면 시공이 양호한 경우는 약0.1%정도 작게 나타났으며, 시공이 불량한 현장인 경우와는 거의 유사하게 나타났다.

또한 시공이 양호한 현장의 계측결과는 이(1993)등이 발표한 스트러트나 어스앵커지지의 경우와 같이 굴착깊이에 따른 최대수평변위 거동이 비슷한 결과를 보이나 변위거동의 내용은 어스앵커나 스트러트 지지방식의 경우 수평변위가 포물선 형태의 굴착과 더불어 하부로 이동하는 반면 쏘일네일링 벽체의 경우 주로 상부에서 발생한다는 점에서 차이가 있다.

한편 11개 현장에서의 토사층 부분만을 고려했을 경우 그림5와 같이 굴착깊이의 약0.3%로 전토층을 고려한 경우보다도 약0.1%정도 크게 나타났다으며 이는 Stocker와 Riedinger(1990), Guillox와 Schlosser(1984)의 결과와 거의 일치하는 것으로 나타났다.

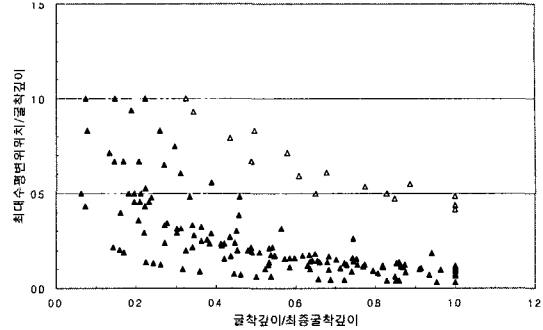


그림6. 굴착단계별 최대수평변위 발생위치

4.1.2 굴착단계별 최대수평변위 발생위치

그림6은 본 연구대상 전체현장에서 단계별 굴착시 각 단계별 벽체의 최대수평변위 발생 위치를 나타낸 것이다. 굴착초기에 굴착깊이와 최대수평변위발생 위치비가 100%를 보이는 것은 경사계 측정이 최하단부터 시작하여 GL.-1.0m까지만 실시되므로 초기 굴착깊이 GL.-1.0m~GL.-2.0m 굴착시에는 굴착면에서 벽체 최대수평변위가 발생하는 것으로 나타나기 때문이다.

한편, 굴착깊이가 깊어지면 벽체 최대수평변위 발생위치가 그림6과 같이 지표면으로부터 굴착깊이의 약 5~15% 이내의 벽체상단부에 위치하는 것으로 나타났고, 제8현장과 같이 일부 현장에서는 굴착과 더불어 최대수평변위 발생지점이 굴착깊이의 약40~50%까지 하부로 이동하는 현상을 보였으며 이런 경우 그림4의 (e)와 같이 포물선 형태의 변위형상을 나타내었다.

4.1.3 최종굴착시 벽체의 경사각

CLOUTERRE 프로젝트(1991)에서 그림7과 같이 굴착에 따른 쏘일네일링벽체 배면지반의 이완영역 범위를 식(2)와 같이 제시한 바 있다.

$$\lambda = H_f(1 - \tan \beta) \chi \quad (2)$$

여기서, λ : 배면지반 이완 영역범위

H_f : 최종굴착깊이

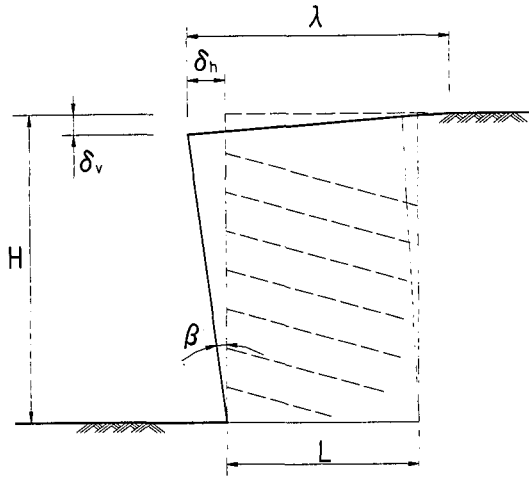


그림7. 쏘일네일링 벽체의 횡방향 변위와 지표면 침하형태

β : 벽체의 경사각
 λ : 이완영역 계수

본 연구대상 현장의 경우 식(2)의 벽체 경사각이 어느 정도의 값을 갖는지를 검토하기 위하여 그림7과 같이 최종굴착깊이(H_f)와 벽체 최상부의 수평변위량(δ_h)이 이루는 각 $\beta = \tan^{-1}(\delta_h/H_f)$ 로 할 때 그림8과 같이 벽체의 경사각 β 는 최소 0.04에서 최대 0.24까지 나타났고, 또한 토사층까지의 굴착만을 고려한 경우 그림9와 같이 굴착깊이의 증가와 더불어 β 가 커지며 최대 약0.23까지 나타났으며 이는 토사층의 두께가 크고, 굴착초기의 수평변위가 크게 나타났기 때문인 것으로 판단된다.

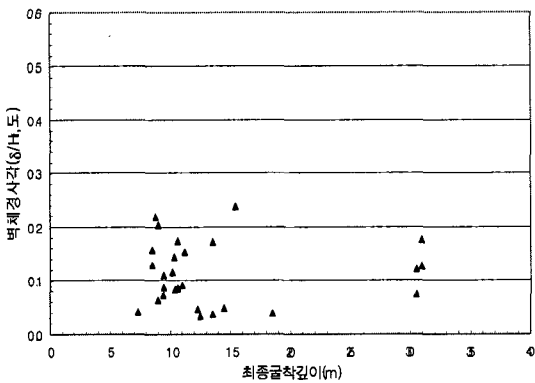


그림8. 최종굴착시 벽체경사각

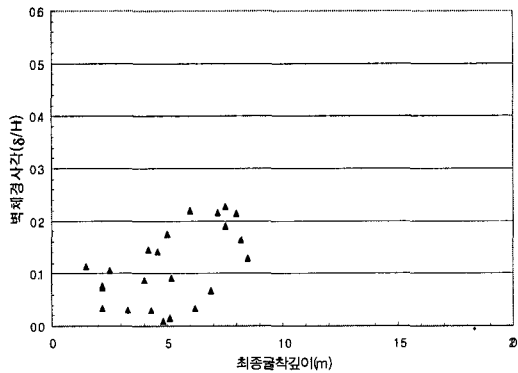


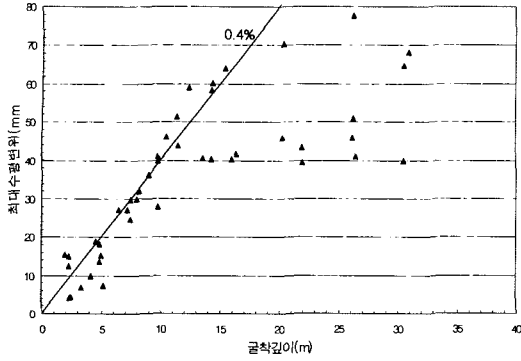
그림9. 토사층에서의 굴착단계별 벽체경사각

4.1.4 네일의 길이비에 따른 최대수평변위량

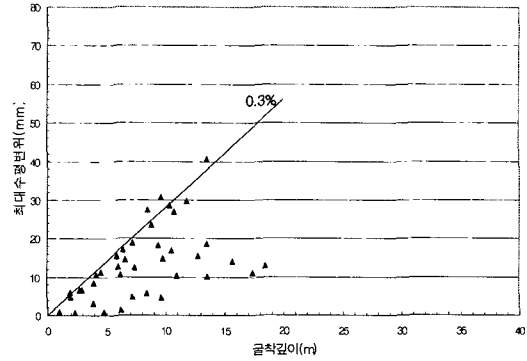
최종굴착깊이(H_f)와 네일의 길이(L)과의 비 $R=L/H_f$ 즉, 길이비 R 이 수평변위에 얼마나 영향을 미치는 지를 알아보기 위해 굴착단계별 굴착깊이와 최대수평변위와의 상관관계를 그림10에 나타내었다.

길이비 R 이 0.5이하인 경우 굴착단계별 최대수평변위가 굴착깊이(H)의 0.4%정도로 나타났으며, R 이 0.5~0.6인 경우 약0.3%, R 이 0.6~0.7인 경우 약0.2%로 길이비 R 이 증가할수록 최대수평변위 발생량이 감소하는 경향을 나타내었다. 그러나 길이비 R 이 0.7이상인 경우는 최대수평변위가 굴착깊이의 약0.3%로 증가하는 것으로 나타났는데 이는 제1현장, 제6현장과 같이 최종굴착깊이가 약11m 이하의 얇은 굴착인 경우이고 토사층 부분이 많았기 때문으로 판단된다. 따라서 토사층의 경우 그라우트의 구근이 완전히 형성된 후 추가굴착을 진행하는 시공상의 주의가 필요한 것으로 판단된다.

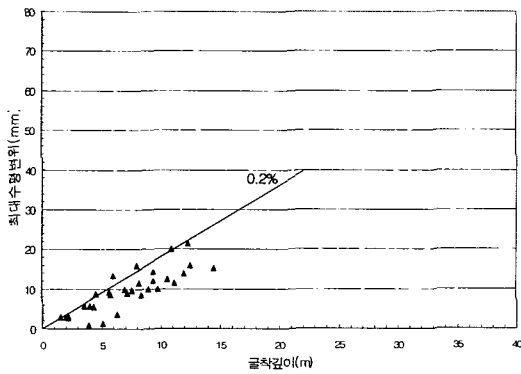
또한 그림11은 최종굴착완료시 최대수평변위와 네일의 길이비 R 과의 관계를 도시한 것으로 네일의 길이비가 증가할수록 최대수평변위량은 감소하



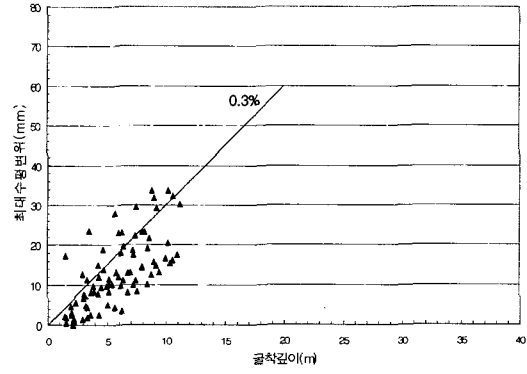
(a) $R = 0.5$ 이하



(b) $R = 0.5 \sim 0.6$



(c) $R = 0.6 \sim 0.7$



(d) $R = 0.7$ 이상

그림 10. 네일의 길이비별 최대수평변위

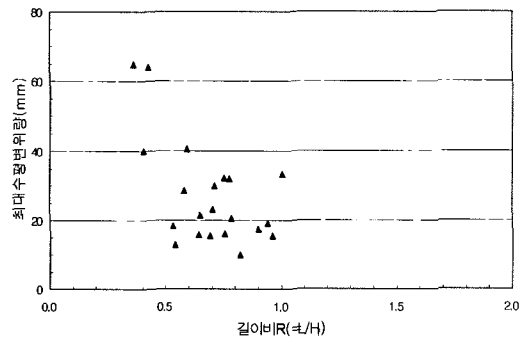


그림 11. 최종굴착시 네일의 길이비와 최대수평변위

는 경향이 나타났으며 통상적인 네일의 길이비인 0.5~1.0사이에서 최대수평변위가 약 35mm이로 발생하는 것으로 나타났다.

4.2 축방향 최대인장력

4.2.1 길이별 최대인장력

각 네일에 작용하는 축방향 발휘인장력중 최대값에 해당되는 최대인장력(T_{max})을 식(3)과 같이 무차원화하여 도시하면 그림12와 같다.

$$K = \frac{T_{max} \cdot \cos \theta}{\gamma \cdot Z \cdot S_v \cdot S_h} \quad (3)$$

여기서, T_{max} : 네일의 축방향 최대인장력

θ : 수평에 대한 네일의 경사각

$\gamma \cdot Z$: 최대인장력점의 수직응력

S_v, S_h : 네일의 수평 및 수직간격

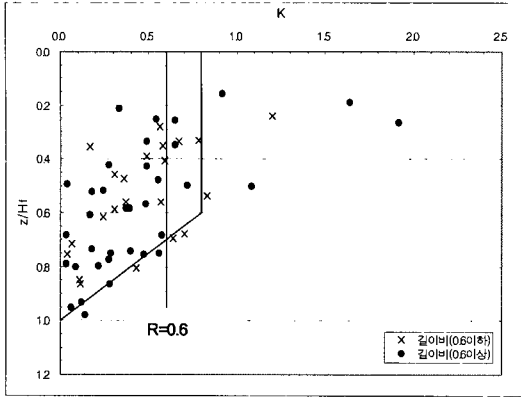


그림12. 깊이별과 네일의 길이별 최대인장력

그림12와 같이 지표면으로부터 최종굴착깊이 (H_f)의 $0.6H_f$ 점까지는 K값이 0.8이하로 나타났으며, $0.6H_f$ 에서부터 최종굴착면까지 선형적으로 감소하는 것으로 나타났다.

이러한 결과는 Schlosser(1982), Cartier-Gigan(1983) 및 Plumelle(1990) 등의 연구결과와 같이 일정한 깊이에서 선형적으로 인장력이 감소하는 경향은 비슷하게 나타났으나, 이들 연구 대상 지반이 단일 토사층에서 이루어진 결과인데 비하여 본 연구대상 지반의 경우는 토사층 하부에 암반층으로 이루어진 지반조건의 차이가 있다.

그러나 최대인장력의 크기는 Schlosser 등의 연구결과와 상당히 많은 차이(약 10ton정도)를 나타내고 있으며 이에 대한 추가적인 연구가 필요한 것으로 사료된다.

4.2.2 네일의 길이비와 최대인장력

네일의 길이비R에 대하여 최대인장력을 무차원화한 K값과의 상관관계는 그림12와 같이 네일의 길이비R이 0.6이하인 경우에는 K값이 0.8까지 나타났으며, R이 0.6이상인 경우에는 K값이 0.6이하로 나타났고 선형적으로 감소하는 변화점도 최종굴착깊이(H_f)의 $0.7H_f$ 정도의 하부로 이동하여 나타났다.

이러한 결과는 4.1.4의 최대수평변위의 거동을

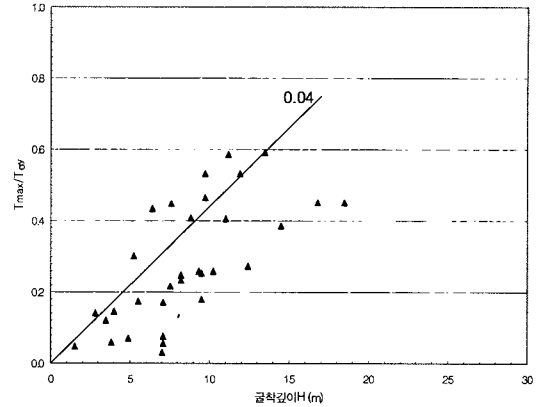


그림13. 굴착단계별 최대인장력의 변화

고려할 때 네일의 길이비가 지반의 안정화에 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

4.2.3 굴착단계별 최대인장력

굴착단계별 네일의 최대인장력 변화를 살펴본 결과 그림13과 같이 네일의 최대인장력(T_{max})과 네일의 항복인장력(T_{sy})과의 비(T_{max}/T_{sy})가 굴착깊이(H)의 증가와 더불어 약 $0.04H$ 의 비로 증가하는 것으로 나타났으며, 그림13에서 최종굴착완료시에 네일의 최대인장력(T_{max})이 네일의 항복인장력(T_{sy})에 최대 60%까지 도달하는 것으로 나타났다.

따라서 굴착깊이의 증가와 더불어 벽체의 변위가 증가는 현상을 고려할 때 네일의 인발시험결과와 더불어 본 연구의 결과를 설계 및 시공시 고려해야 될 것으로 사료된다.

5. 결론

쏘일네일링 벽체를 형성하여 굴착하는 국내 11개 현장 16개 단면에서 경사계와 변형률계 자료를 토대로 하여 벽체의 변위 및 네일에 작용하는 인장력의 거동을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 지층이나 현장조건에 따라 수평변위량의 차이

는 약간 있으나 굴착깊이와 최대수평변위량과의 상관관계에서 최대수평변위량은 굴착과 네일의 시공과정이 양호한 현장의 경우 굴착깊이(H)의 0.2%이하로 나타났으며, 지반조건이나 굴착과 네일의 시공이 불량한 현장의 경우에는 수평변위가 굴착깊이의 0.3%까지로 나타났다. 또한 전현장에서의 토사층 부분만을 고려했을 경우 굴착깊이의 약0.3%로 나타났다.

- 2) 벽체의 최대수평변위 발생위치는 지표면으로부터 굴착깊이의 약 5~15%이내의 벽체상단 부에서 발생하였다.
- 3) 최종굴착깊이(H_f)와 네일의 길이(L)와의 길이비 R이 0.5이하인 경우 굴착단계별 최대수평변위가 굴착깊이(H)의 0.4%정도로 나타났으며, R이 0.5~0.6인 경우 약 0.3%, R이 0.6~0.7인 경우 약0.2%로 길이비 R이 증가할수록 최대수평변위 발생량이 감소하는 경향이 나타났다. 그러나 길이비 R이 0.7이상인 경우에는 최대수평변위가 굴착깊이의 약0.3%로 증가하는 것으로 나타났으며 이러한 결과는 굴착깊이가 얕고, 토사층 부분이 많았기 때문으로 판단된다.
- 4) 네일의 최대인장력을 무차원화한 K값은 지표면으로부터 최종굴착깊이(H_f)의 0.6 H_f 점까지는 0.8이하로 나타났으며, 0.6 H_f 에서부터 최종굴착면까지 선형적으로 감소하는 것으로 나타났다. 또한 길이비R이 0.6이하인 경우 K값이 0.8까지 나타났으며, R이 0.6이상인 경우에는 K값이 0.6이하로 나타났고 선형적으로 감소하는 변화점도 최종굴착깊이(H_f)의 0.7 H_f 정도의 하부로 이동하여 나타났다.
- 5) 최종굴착완료시 네일의 최대인장력(T_{max})이 네일의 항복인장력(T_{oy})에 최대 60%까지 도달하는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 1997년 해외 Post-

doc. 연수지원에 의해 수행되었으며 당 재단에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 김준석, 이석태, 김두년, 이상덕, 이승래(1994), "Soil Nailing공법의 파괴구조에 관한 실험적 연구", 94년 대한 토목학회지 학술발표회 논문집 (I), pp. 589~592
2. 김홍택(1995), "Nailed-Soil 굴착벽체의 발휘인장력 예측", 한국지반공학회지, 11권 2호, pp. 79~97
3. 이종규, 전성곤(1993), "다층지반 굴착시 토류벽에 작용하는 토압분포", 한국지반공학회 지, 9권 1호, pp. 59~68
4. Bang, S., Shen, C.K., Kim, J. and Kroetch, P.(1992), "Investigation of Soil Nailing System", "TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp.37~43
5. Cartier., G. and Gigan, I.P.(1983), "Experiments and Observations on Soil Nailing Structures", Proceeding of the VIII Conference of the ECSMF, Helsinki, Finland, pp. 473~476
6. French National Research Project Clouterre(1991), "Recommendations CLOUTERRE -1991"
7. Guilloux A., Schlosser, F.(1984), "Soil Nailing Practical Applications" Symposium on Soil and Rock Improvement Techniques, Bangkok.
8. Juran, I, Baudrand, G., Farrag, K. and Elias, V.(1990), "Design of Soil Nailed Retaining structures", Design and Performance of Earth retaining Structures, Geotechnical special Publication No. 25, ASCE, pp. 644~659
9. Plumelle, C., Schlosser, F., Delage, P., and Knochenmus,G.(1990), "A French National Research Project on Soil Nailing : Clouterre", Geotechnical special Publication No. 25, ASCE, pp. 660~675
10. Schlosser, F.(1982), "Behavior and Design of Soil Nailing" International Symposium on Recent Development in Ground Improvement Techniques, Bangkok.
11. Stocker, M.F., Korber, G.W., Gassler, G., Gudeus, G.(1979), "Soil Nailing", International Conference on Soil Reinforcement, Paris, pp.469-474
12. Stocker, M.F. and Riedinger, G.(1990), "The Bearing Behaviour of Nailed Retaining Structures", Geotechnical Special Publication No. 25, pp. 612~628

(접수일자 1999. 6. 20)