

굳은 점토에 정착된 앵커의 거동 특성 고찰 Field Instrumentations of Ground Anchor Embedded in Stiff Clay

- 인천국제공항 여객터미널 기초굴토공사 계측을 중심으로 -

한석희, Han Seok Hee¹⁾ 한경제, Han Kyeong Je²⁾ 고문수, Go Mun Su³⁾

¹⁾ (주)유신코퍼레이션 지반공학부 이사, P.E.

²⁾ (주)유신코퍼레이션 건설기술연구소 과장, Ph. D.

³⁾ (주)유신코퍼레이션 지반공학부 과장

1. 개 요

인천광역시 중구 영종도-용유도 매립지역에 건설되는 수도권 신공항의 여객터미널 기초굴착공사에서는 앵커로 지지를 받는 Sheet Pile 지지벽체로 시공이 진행되었으며, 이로 인해 일부 앵커가 견고한 하부 해성점토지반에 정착되게 되었다. 이에 대한 굴토공사 초기부터 현재에 이르기까지의 1년 이상 조사된 계측자료를 토대로 점토지반에 정착된 앵커의 거동특성을 살펴보았으며, 이를 사질토지반에서의 거동과 비교 분석하였다.

본 고찰에서는 점성토 지반에 대한 앵커 정착부의 Creep 거동 관점에서 앵커효과를 사질토지반에 정착된 사례와 비교 분석하였으며, 기초굴토가 완료된 현단계 까지의 특징적인 계측결과를 보고하고자 한다. 점토지반의 Creep 거동을 분석하기 위해서는 좀더 장기적인 관점이 요구되므로 현 단계에서는 점성토 지반에 정착된 앵커의 대략적인 거동특성 및 계측결과 분석방향만을 제시하고, 향후 계속적인 계측자료를 취합하고, 다양한 사례를 수집·분석하여 계속적인 연구를 수행하고자 한다.

1.1 지층 구성

신공항 여객터미널 기초굴토공사는 인천광역시 중구 영종도와 신불도 사이의 해역을 준설 매립으로 조성한 지반 위에 건설될 구조물 기초 터파기 공사이다. 지층의 구성은 상부로부터 준설매립층(모래), 상부해성퇴적층, 하부해성퇴적층, 풍화잔류토, 풍화암층, 연암층의 순으로 분포되어 있다. 상부해성퇴적층은 연약한 점성토로 구성되어 있으며, 하부해성퇴적층은 비교적 굳은 점성토 또는 실트, 모래, 자갈 등으로 구성되어 있다. 풍화암 및 연암은 중생대 쥐라기의 대보화강암으로 구성되어 있으며, 주 구성광물은 석영, 흑운모, 장석 등으로 중립 내지 조립질로 나타나고 있다. [표 1]

에 각 지층의 성층상태 및 구성성분 등의 지층개요를 나타내었다.

[표 1] 조사지역의 지층개요

지 층 구 성	흙의 종류 (통일분류)	두께(m)	N 치	비 고
준 설 매 립 층	SM, SP	1.0~ 5.3	0~11	느슨한 실트질 모래
상부해성퇴적층	ML, CL	4.0~ 9.0	1~ 4	연약 점성토
하부해성퇴적층	CL, ML, SM	23.0~31.0	4~50	Sand Seam 부분 분포
잔 류 토 층	SM	0.6~ 6.1	27~50	매우 조밀한 상태
풍 화 암 층	-	1.7~11.4	-	심한풍화작용
연 암 층	-	2	-	풍화진행상태

1.2 현장 조건

연약한 상부해성퇴적층을 Sheet Pile 토류벽과 Earth Anchor로 지지하며 굴착하였다. 이 때 Earth Anchor의 정착부는 주로 하부해성퇴적층에 위치하도록 설계되어 있다.

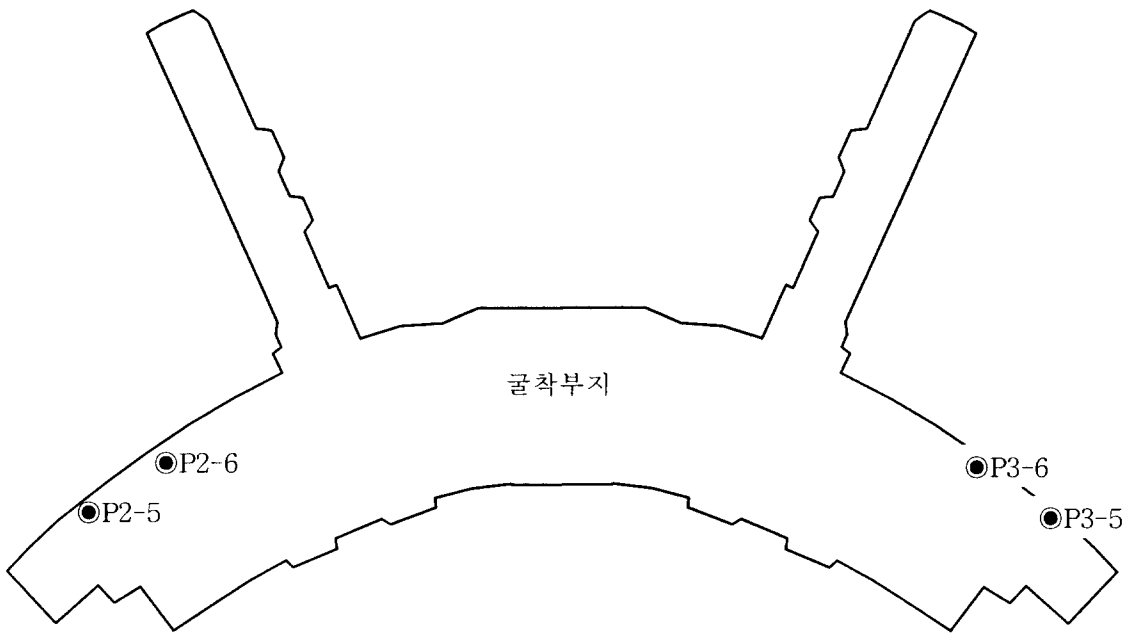
Sheet Pile 항타는 96년 9월말에 시작하여 10월말에 종결하였고, 동년 9월초부터 각 구간의 Earth Anchor시공과 하부굴착이 개시되었다. 97년 6월 중순경 부지 중앙부 굴착이 완료되었으며, Earth Anchor 시공은 97년 7월 중순에 완료되어 97년 8월 15일자로 가시설해체 및 되매우기 공정을 앞두고 있으며, 현재 건축구조물 골조공사가 진행되고 있다.

1.3 계측분석 대상지역

본 현장의 계측항목은 주로 지중응력 해방에 의한 토류벽체와 주변지반의 거동파악을 위한 목적으로 선정되었다. 전체적인 계측항목 및 설치수량은 [표 2]와 같으나, 여기서는 굳은 점토지역에 정착된 앵커의 장기 거동특성을 살펴보기 위해 앵커 하중 및 벽체의 수평변위 계측결과가 1년 이상된 자료를 수집하여 분석하였다. 대상위치는 [그림 1]에 표시된 4개소이다.

[표 2] 계측항목 및 설치수량

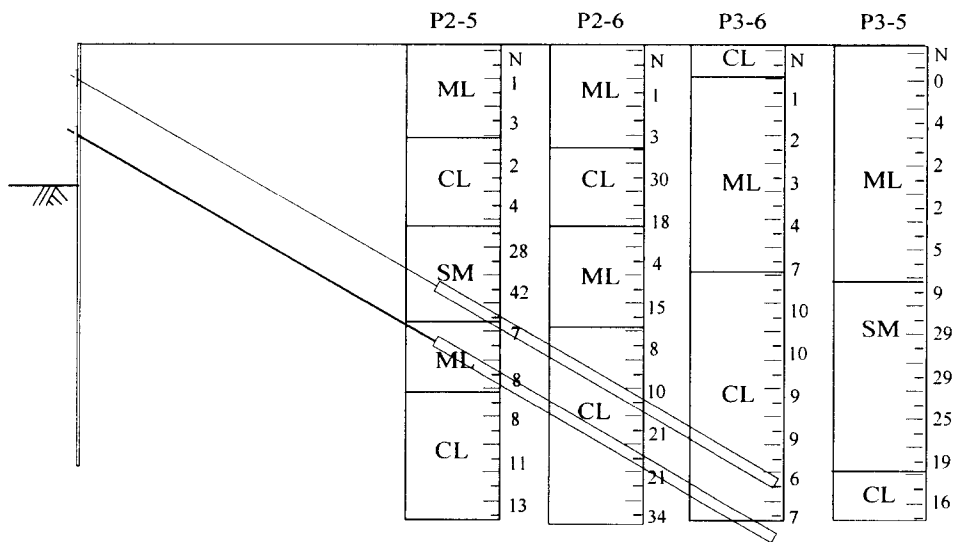
항 목	설 치 목 적	설 치 수 량
지중경사계	·굴착지반의 변형, 거동상태 파악 ·허용변위와 실측변위의 비교에 의한 안정성검토	29 개소
지하수위계	·굴착공사시 토류벽 배면의 지하수위 변화파악	16 개소
간극수압계	·굴착공사시 배면지반내 응력상태 파악	16 개소
하 중 계	·Earth Anchor에 의한 반력변화 측정 ·허용 Anchor력과의 비교를 통한 안정성 확인	38 개소



[그림 1.1] 굴착부지 및 계측위치(여객터미널 지역)

1.4 앵커 정착장의 위치

[그림 1.1]의 각 계측 위치별 앵커 정착장이 위치하게 되는 지반의 Profile은 [그림 1.2]와 같다.

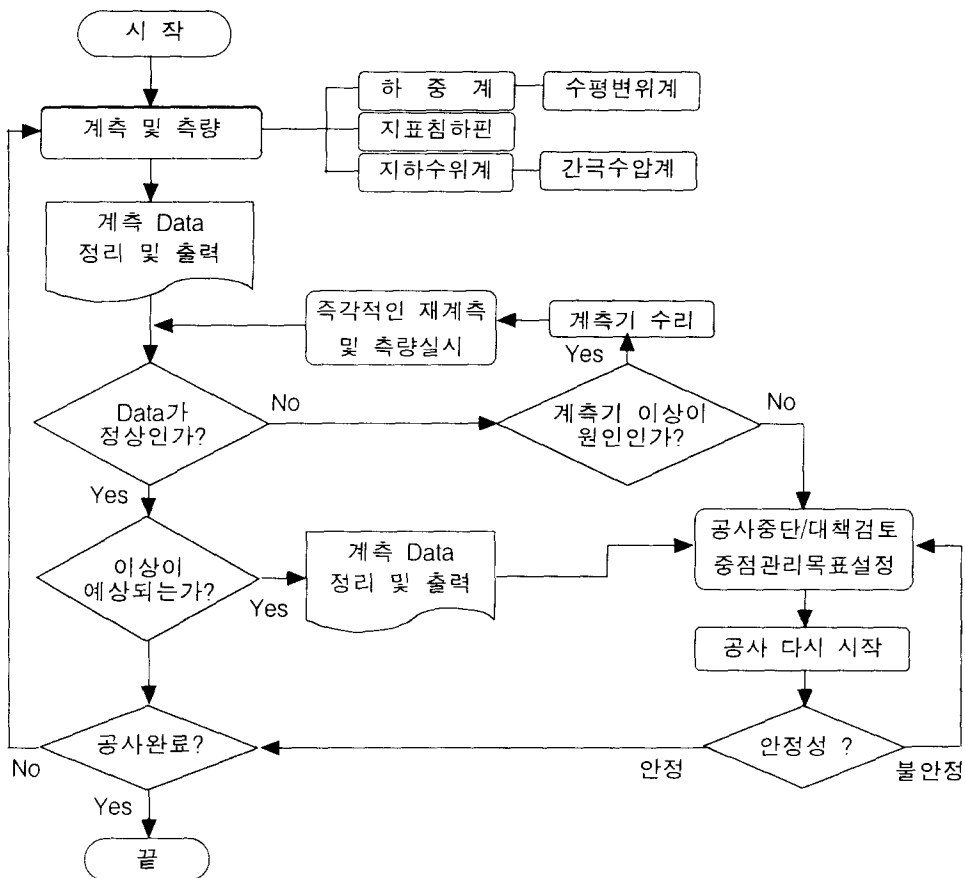


[그림 1.2] 각 계측지역 앵커 정착장 위치의 지질 주상도

2. 계측계획

2.1 계측 및 Feed-Back System

계측(Instrumentation)이란 공사에 있어서 합리적인 시공과 안정관리를 위하여 거동에 대한 정보를 정확, 신속하게 수집하여 관리하기 위한 안전관리 체계로서 목적에 적합한 계측항목 및 측정점의 선정, 관리 기준치의 설정이 가장 중요한 사항이다. 계측에 있어서 안정성 확보, 경제성 향상, 품질관리 등의 계측목적이 성공적으로 달성되기 위하여 계측결과는 반드시 당초의 설계 및 시공 계획에 효과적으로 Feed-Back 되어야 한다. 본 현장의 계측관리를 위하여 검토, 설정한 계측 및 계측계통은 [그림 2.1]과 같으며, 이를 통하여 시공 단계에서도 설계와 시공간의 유기적 결집을 통한 지반여건에 적합한 최적설계의 추구와 재해예방 및 유사시 최적 대응조치의 신속한 수행이 가능하도록 하였다.



[그림 2.1] 계측 및 Feed-Back System의 흐름도

관리기준치에 따른 계측 Feed-Back 계통이 원활히 수행되기 위해서는 현장에서 측정된 계측자료를 가능한 신속히 분석하여 설계·시공상의 제반 문제점을 파악하고 이에 따른 적절한 대책을 즉각 강구하여야 한다. 따라서 굴착에 있어서는 특히 신속한 자료수집, 자료의 도표화 및 분석, 대응조치의 강구는 물론, 계측자의 측정오차나 해석자 판단착오 등에 따른 개인별 오차의 최소화가 가능하도록 전산화된 계측자료의 수집 및 관리체계를 구축하여야 한다. 현장에서 얻어진 자료는 즉시 Graph등으로 가시화 하여 안정성여부를 확인할 수 있어야 한다. 또한 성과를 당초의 예측치 및 관리기준치와 비교하여 차이가 있으면 이에 대한 원인규명 및 대책을 수립하여야 한다. 이러한 계측자료 수집 및 관리체계 구축을 통하여 굴착 건설에서 필수적으로 요구되는 고도의 안정성 확보는 물론 유사시 신속한 최적의 대응조치가 가능해지므로, 과거 굴착에 필연적으로 수반되었던 각종 사고, 재해 및 민원이 줄어들며, 시공 기술단과 설계 기술단 간의 원활한 의사소통과 기술교류가 활성화되어 계측목적의 효율적 달성은 물론 장기적으로 국내의 설계 및 시공기술의 축적과 향상이 이루어 질 수 있다.

2.2 계측빈도

계측기기의 초기측정은 신뢰성 있는 기초자료로 활용할 수 있도록 시공 전에 얻어져야 할 것이며 측정빈도는 공정진행정도에 따라 적절히 조정되어야 한다. 계측빈도는 계측의 중요성, 계측의 목적, 공사의 진척정도, 계측방법 등에 따라서 조절되어야 하고, 대표기준치 등을 선정하여 기록으로 남기는 것이 효과적이다. 건설계측은 계측치의 절대치 관리의 개념보다는 시간경과에 따른 추이와 변화속도를 더 중요시하므로 대개의 경우 계측빈도가 현장에 따라 다르게 결정되어 사용된다. 일반적으로 굴착 중에는 3일 정도의 간격이 적당하며, 지지구조물 해체 시에는 해체를 전후하여 2일에 걸쳐서 시행하여야 거동을 대표할 수 있는 자료를 얻을 수 있다. 또한 위험 요소가 발견되면 측정빈도를 1일에 1회 이상으로 증가시킬 필요가 있다. 측정일시 사이의 공백기간 중에 발생하는 변화도 육안관찰 및 측량 등의 방법으로 정량화 하여 연속성 있는 자료가 되도록 한다. 자료수집 시에는 공사내용 및 주변현황, 기상조건, 굴착면의 불연속면 발달상태, 특이사항 등을 세밀히 기록하여 성과분석시 이를 유효 적절히 사용할 수 있도록 조치하는 것이 보다 정확한 분석에 도움이 된다.

이러한 검토 기준에 의거하여 선정한 현장의 계측항목별 계측빈도는 [표 2.1]과 같다.

[표 2.1] 계측빈도

계측항목	측정시기	측정빈도	비 고
경 사 계	설치 후	1 회/일 3 일간	초기치 선정
	굴착공사 진행중	2 회/주	지보공 설치시 추가측정
	굴착공사 완료후	1 회/주	지보공 해체전후 추가측정
하 중 계	설치 후	2 회/일	초기치 선정
	굴착공사 진행중 *	2 회/주	지보공 설치시 추가측정
	굴착공사 완료후	1 회/주	지보공 해체후 추가측정

표에서 *로 표시된 시기에서는 외부하중 및 지반거동 변화시 추가측정을 실시하며 공사가 중단된 경우에는 측정빈도를 재조정해야 한다.

3. 계측결과분석

계측결과는 경사계 계측에 의한 시간-Sheet Pile의 변위와 앵커두부의 하중계 측정에 의한 시간-하중의 변화량 결과로 구분하여 정리하였다. 계측 대상 앵커의 설계 체원값은 [표 3.1]과 같으며 탄성계수 값은 $2.1 \times 10^6 \text{kg/cm}^2$ 이다.

[표3.1] 앵커의 설계 체원값

설계체원	전체길이 (m)	정착장 (m)	자유장 (m)	단면적 (cm ²)	설계하중 (ton)	최대항복하중 (ton)
값	29	14	15	3.948	30	53

3.1 Sheet Pile 의 변위

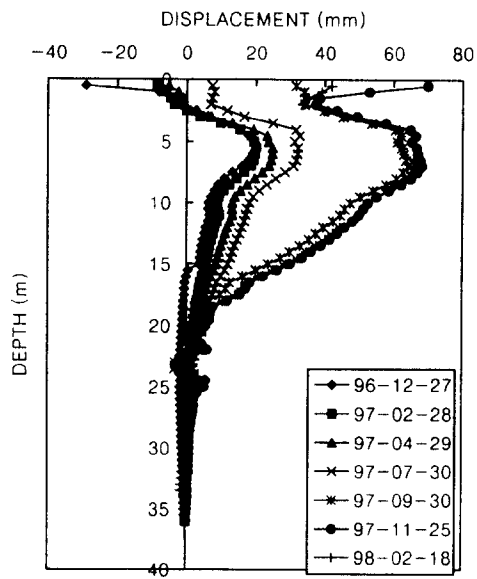
각 구간의 경사계로 1996년 12월부터 1998년 2월까지 계측한 [경과시간-Sheet Pile 변위자료]를 분석하였다. 앵커의 정착부가 위치한 지층의 특성은 [그림 1.2]의 주상도를 참조하여 [표 3.2]와 같이 구분하였다.

[표 3.2] 앵커 정착부의 지층 특성

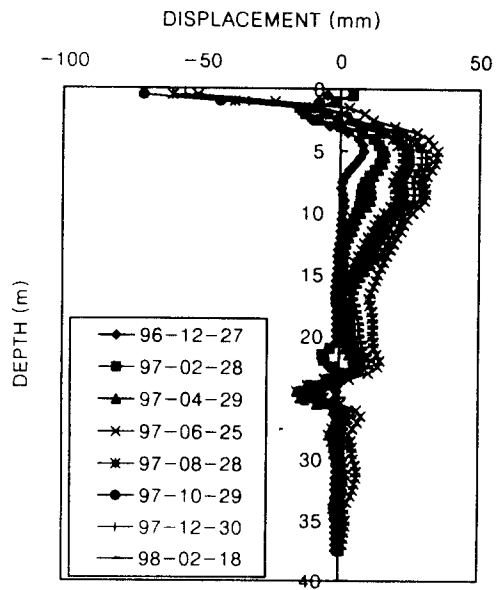
계측위치	앵커정착부 지층의 주요성분	평균 N 값	비고
P2-5	견고한 실트질 점토	9	ML-CL
P2-6	견고한 점토	15	CL
P3-5	조밀한 모래	25	SM
P3-5	견고한 점토	9	CL

[표 3.2]를 참조하면 p3-5 지역을 제외한 나머지는 앵커의 정착부가 견고한 점성토층에 정착되어 있는 상태임을 알 수 있다.

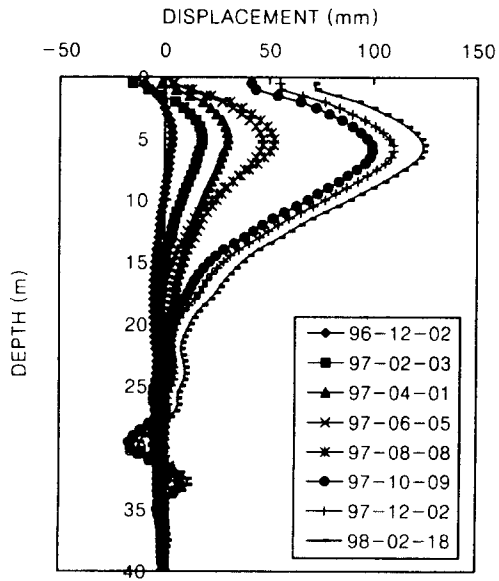
[그림 3.1]~[그림 3.4]는 시간에 따른 벽체의 수평변위를 나타낸 것이다. 전체적인 경향은 각 구간에서의 변위 증가추세가 다소 둔화되거나 안정상태를 보인다. 계측결과로부터 굴착면 바닥에서 sheet pile 벽체의 최대변위가 나타났고, 벽체 전체가 축방향으로 밀려났음을 알 수 있다. 이러한 원인으로서는 다음과 같은 점들을 들 수 있다.



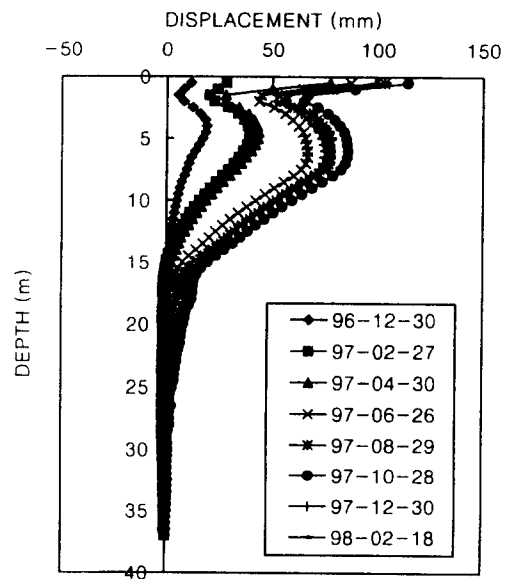
[그림 3.1] p2-5 벽체 변위



[그림 3.2] p2-6 벽체 변위



[그림 3.3] p3-5 벽체 변위



[그림 3.4] p3-6 벽체 변위

1) 원지반이 연약 해성점토층으로 이루어져 있고, Sheet Pile 벽체가 N=10 정도인 점토층에 근입되어 있다.

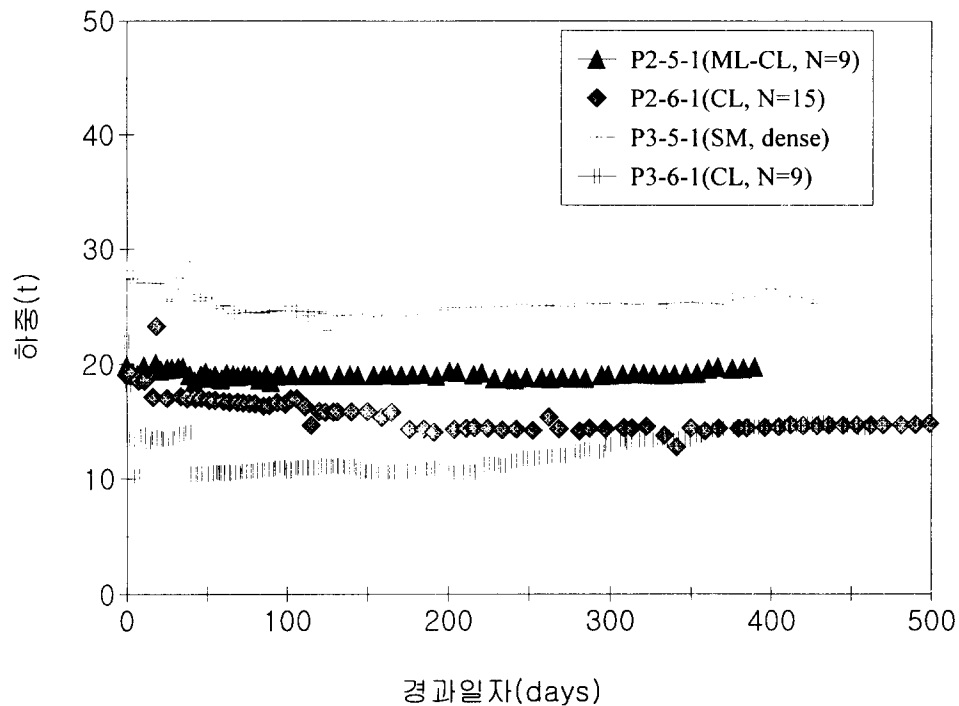
2) 굴착면적이 매우 넓기 때문에 굴착직후 빠른시간내에 Anchoring이 이루어지지 않아 벽체에 과도한 변위가 발생한 것이다.

굴착면 바닥에서 각각의 그림들을 살펴보면 경과시간에 대한 Sheet Pile의 수평변위 양상은 견고한 점토층에 정착된 앵커의 경우가 조밀한 모래층에 정착된 경우에 비해 변화의 폭이 작으며, 전체 변위량 또한 작게 나타났다. 또한 점토층이 견고한 정도가 큰 경우[그림 3.2]의 벽체 수평변위의 변화양상이 적은 것으로 나타났다. 제한된 자료이긴 하지만 이들 결과를 비교해 볼 때 견고한 점토층에서도 앵커의 작용이 효과적이라는 사실을 알 수 있다.

[그림 3.1]~[그림 3.3]에서 25m 깊이 부분의 변위 굴곡은 경사계 설치시 Grouting처리가 안되어 생겨난 경사계 설치공 내의 공간으로 인한 것으로 생각된다.

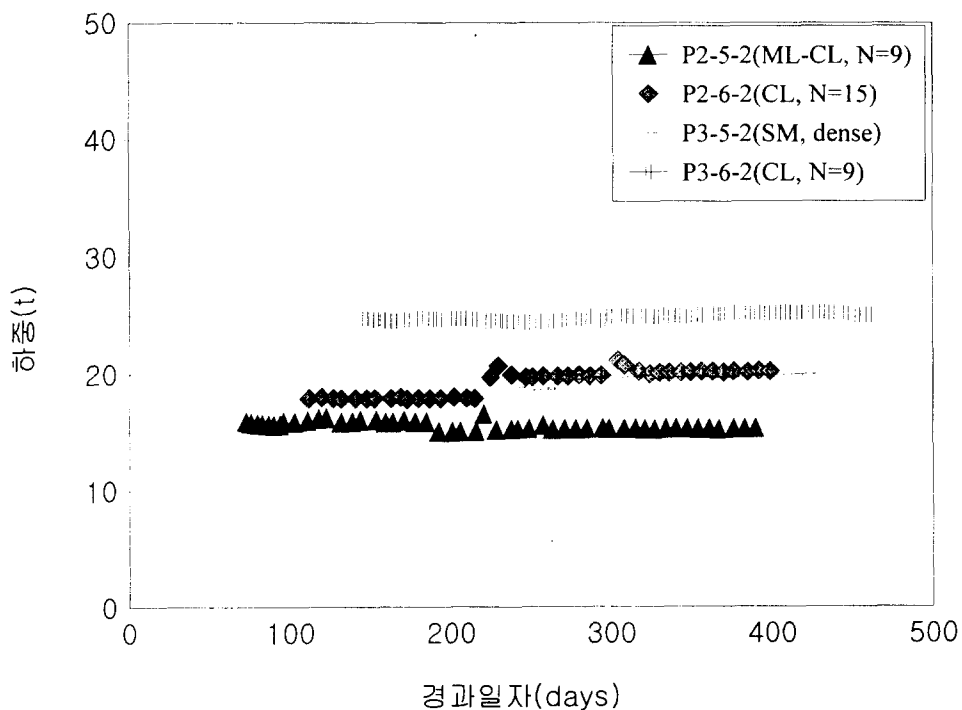
3.2 반력하중의 변화 특성

반력하중의 시간에 따른 변화특성을 보기 위해 1단 및 2단에 설치된 앵커의 경과시간-하중곡선을 [그림 3.5] 및 [그림 3.6]에 도시하였다.



[그림 3.5] 1단 설치 앵커의 반력하중

[그림 3.5]의 1단에 위치한 앵커의 반력하중 거동특성은 전체적으로 측정 초기에 변화양상을 보이나 점차로 일정한 값을 유지하는 것으로 나타났다. 사질토 및 점성토의 두 경우 모두 설계하중에 대한 앵커의 인장력 감소율이 전반적으로 적은 편이나 점토층의 경우는 앵커 인장력이 낮은 수준으로 유지되고 있다. 이는 초기 앵커링 후 정착 및 프리텐션(Pretension)과정에서 발생한 하중 손실의 영향 때문인 것으로 생각된다. 한편 2단에 설치된 앵커의 경우는 사질토의 하중유지수준과 비슷한 하중변화 특성을 나타내고 있다. 이는 견고한 점토층에서도 사질토층과 마찬가지로 앵커의 프리텐션이 잘 유지되고 있음을 뜻한다.



[그림 3.6] 2단 설치 앵커의 반력하중

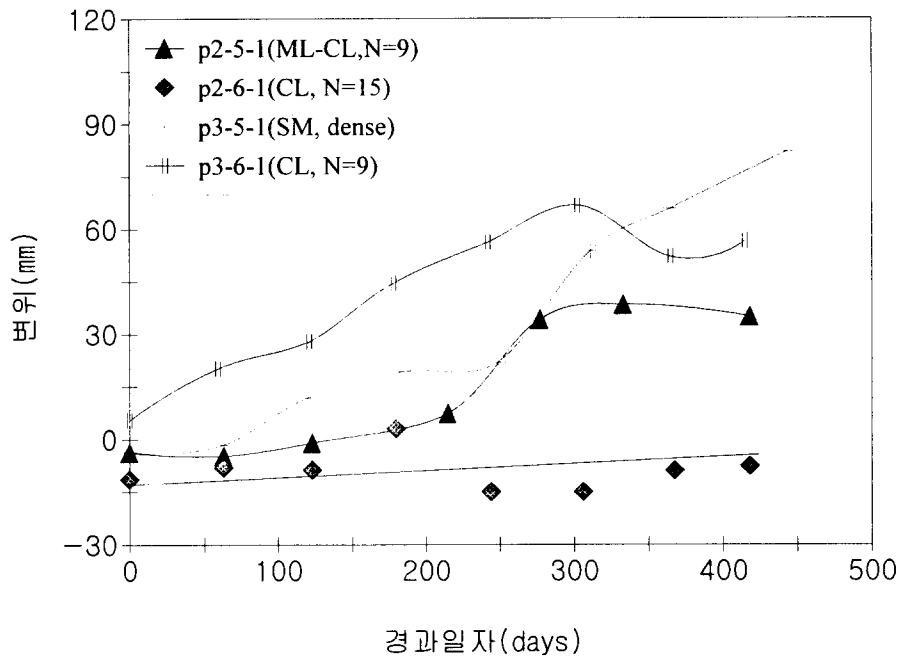
3.3 앵커의 크리프 특성

지반으로 영구적인 인장력을 전달하는 앵커는 항상 시간의 경과에 따라 초기 프리스트레싱의 손실이 발생하게 되는데 대표적인 원인으로는 앵커강선의 응력이완(Relaxation)과 지반의 크리프(Creep) 특성을 들 수 있다. 장기하중하에서 프리스트레싱을 받는 강선의 응력이완 손실은 일반적으로 5~10%정도인 것으로 알려져 있다. 강선이 장기하중을 받는 경우 크리프 변형에 의한 프리스트레싱 손실은 응력이완효과에 비교해 볼 때 무시할 만큼 작다.

흙과 연암에서 크리프 변형은 지반의 압축성에 기인하며, 점토 및 가늘고 균등한 조립토에서 두

렸한 변형양상이 지속적으로 진행된다. 이러한 흙에서는 앵커 정착부에서 Creep 변형이 크게 나타난다. 또한 앵커 정착부 주변으로 소성흐름이 발생하여 극한 하중에 도달하게 되므로 시간이 흐름에 따라 변형이 진행되어 앵커에 요구되는 인장력이 영구적으로 유지되지 못한다. 흙과 연암에서 크리프 변형으로 인한 프리스트레싱 손실은 1년 가까이 긴 시간간격으로 반복하여 스트레싱함으로서 보상되므로 정착부의 하중전달 능력이 초과되는 위험은 없다.

앞에서 살펴본 바와 같이 점토 및 모래층에 정착된 앵커의 하중이 일정하게 유지되는 반면 Sheet Pile의 변위는 작으나마 계속적으로 발생한다는 점을 생각해 볼 때 크리프 거동의 특성을 서로 비교해 보는 것도 의미가 있을 것으로 생각된다. 경과시간에 대한 변위의 진행정도를 알기 위하여 [그림 3.7] 및 [그림 3.8]과 같이 도시하였다.



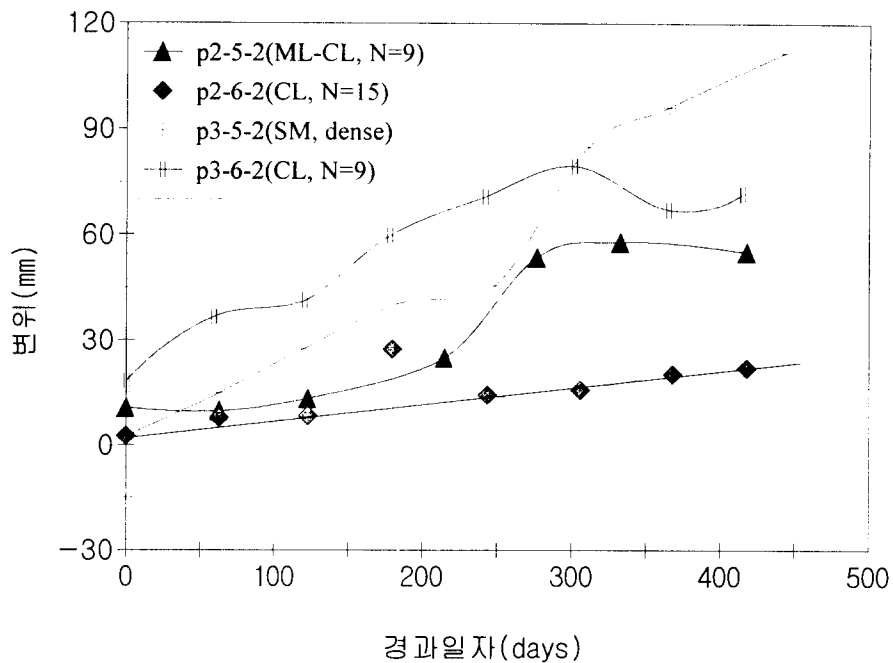
[그림 3.7] 1단 설치 앵커의 크리프 특성

1단과 2단은 동일 Sheet Pile로 연결되어 있으므로 상기 그림들과 같이 서로 비슷한 유형의 측정결과를 나타낸다. 다만 2단 설치 앵커의 변위-시간 곡선 기울기가 따라 다소 크게 나타나는 현상은 1단 설치 앵커의 영향으로 상부의 지층이 횡방향으로 구속되어 Arching Effect로 인한 토압이 재분배 때문이라고 생각된다.

[그림 3.7] 및 [그림 3.8]에서 평균 N=15인 견고한 점토층의 경우가 시간-변위 관계곡선의 기울

기가 가장 낮고 Data 분산이 비교적 작은 직선으로 나타났다.

한정된 자료와 기간으로 점토의 장기적인 크리프 거동을 논의한 다는 것은 무리가 있지만 현재의 계측결과 분석을 종합해 볼 때 굳은 점토 지반에 정착된 앵커의 효과가 충분히 발휘되고 있으며, N=15정도의 균기를 갖는 점토에서는 크리프 손실에 대해서도 안정적인 것으로 생각된다.

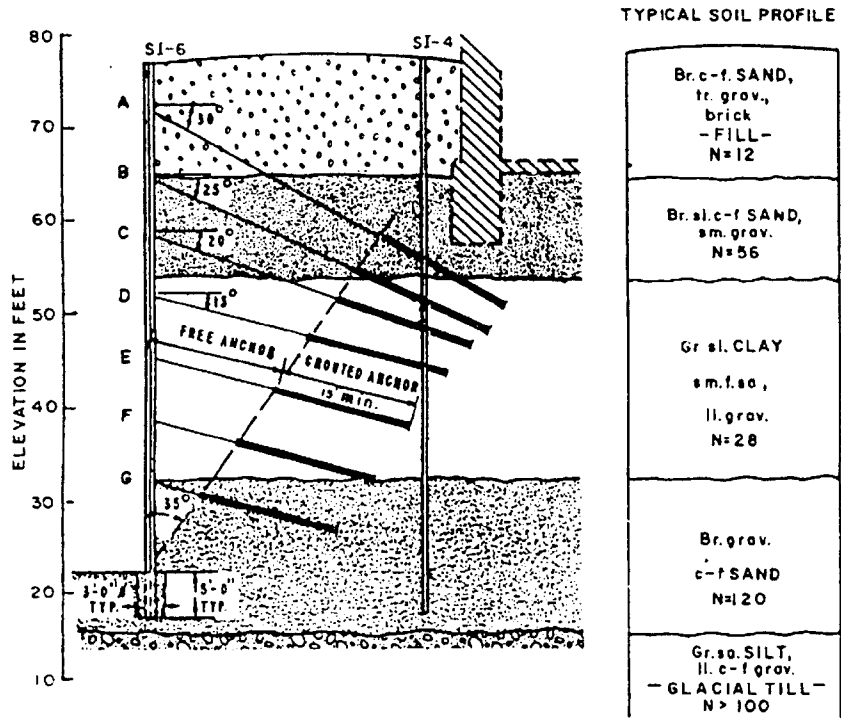


[그림 3.8] 2단 설치 앵커의 크리프 특성

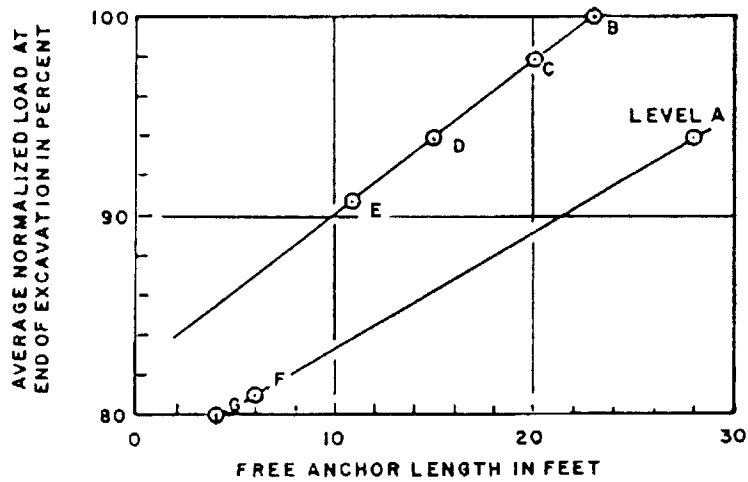
점성토에 앵커효과가 발휘된 사례로 미국 Boston시의 Office 빌딩 건설을 위한 기초굴토공사의 경우가 ASCE에 보고된 바 있다. Thomas 등은 [그림 3.9]와 같은 지층구조에 대한 굴토공사후 앵커의 계측사례를 분석하여 [그림 3.10]과 같은 결과를 도출하였다.

[그림 3.10]은 계측된 앵커의 작용반력을 설계인장력으로 나누어 준 값을 앵커의 자유장에 대해 도시한 것이다. [그림 3.10]에서 Level A, F, G는 [그림 3.9]에서 알 수 있듯이 사질토 지층에 앵커가 정착된 경우이고 Level B, C, D, E는 N=28인 견고한 점토층에 앵커가 정착된 경우이다.

결과로서 점성토 지반에 정착된 앵커의 경우가 사질토 지반에 정착된 경우보다 앵커 프리스트레싱의 손실이 작다고 보고되었다.



[그림 3.9] 굴착지반의 주상도 및 앵커설치 위치(Tomas, 1992)



[그림 3.10] 앵커의 자유장 길이와 작용반력과의 관계(Tomas, 1992)

4. 결 론

굳은 점성토 지반에 앵커를 정착시킨 경우의 앵커의 거동특성을 분석하여본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 본 계측사례 분석에 의하면 N=15이상의 굳은 점성토의 경우 Creep거동에 대해 안정함을 보였다.
- 2) 앵커의 효과를 충분히 발휘하기 위해서는 앵커의 초기 설치 단계에서 프리스트레싱 과정에 주의를 기울여야 한다.
- 3) 변위 측정시 경사계 설치시 경사계 Boring 홀 Grouting 작업에 유의하여 홀내에 빈 공간이 없어야 한다.
- 4) 본 계측사례 분석은 앵커설치에서 굴착완료까지의 계측결과에 대한 것으로서, 현단계에서 Creep 거동을 논의하기보다는 조금더 장기적인 관점에서 연구되어야 한다. 본 계측사례는 1998년 말까지 계속 진행될 예정이므로 차후 계측사례를 보강하여 굳은 점성토 지반에 정착된 앵커의 Creep 거동특성 및 적용성 분석을 계속할 예정이다.

5. 참고문헌

- 1) Hanna(1982), "Foundations in Tension - Ground Anchor", McGraw-Hill, pp.209~251
- 2) Hobst L. & Zajic J.(1983), "Anchoring in Rock & Soil", Developments in Geotechnical Engineering 33, Elsevier Scientific Publishing Co. Amsterdam.
- 3) Tomas K. Liu, John P. Dugan, Jr.(1992), An Instrumented Tied-Back Deep Excavation, proceedings of the Specialty Conference on performance of Earth and Earth-Supported Structures, ASCE, pp.1323~1339
- 4) Xanthakos P.(1991), "Ground Anchors And Anchored Structures", John Wiley & Sons, Inc.,
- 5) 신공항 건설공단(1997), "수도권 신공항 여객터미널 굴토공사 계측 정기 보고서", 제15권
- 6) 한국지반공학회 정보화시공위원회(1997), "인천국제공항 여객터미널 굴토공사 계측사례", '97 정보화 시공·지반굴착 위원회 공동 학술발표회 논문집.