

Earth Bolt로 보강된 압축토(PEM) 옹벽의 거동 특성 Behavioral Characteristics of Prestressed Earth Method Reinforced with Earth Bolt

김홍택¹⁾, Hong-Tak Kim, 이혁진²⁾, Hyuk-Jin Lee, 김종민³⁾, Jong-Min Kim, 류준원⁴⁾, June-Won Ryu, 성낙영⁵⁾, Nak-Young Sung

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

²⁾ 홍익대학교 토목공학과 박사 후 과정, Post Doc., Dept. of Civil Engineering, Hongik University

³⁾ 도화종합기술공사 사원, Geotechnical Dept., Dohwa Consulting Engineers, CO.,LTD.

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

⁵⁾ (주)팸텍 대표이사, President, Pemtech.

SYNOPSIS : PEM(Prestressed Earth Method) is a method to minimize lateral movements of the ground generated by progressive excavation and increases shear strength by applying prestresses to the end of earth bolt equipped with a P.C. panel after earth bolt is set up under the in-situ ground. In case of PEM, there are noticeable advantages. First of all, PEM maximizes the utility of the ground because PEM needs less volume of backfill and cutting than other general walls. Second, it's an environmental method possible to garden on the banquette.

In this study, the behavioral characteristics of PEM are analyzed and compared with soil nailing system through the measured data of PEM and numerical method using SMAP-2D program and also an increased stability of PEM is evaluated by increasing prestress of earth bolts through the numerical analysis using Slide (ver. 4.0) program.

Key words : PEM, Earth bolt, Precast concrete panel, Numerical method

1. 서 론

압축토(PEM, Prestressed Earth Method) 옹벽은 단계별 굴착에서 불가피하게 발생하는 지반의 횡방향 변위를 최소화시키기 위해서 earth bolt를 원지반에 설치한 후 끝단을 P.C. panel에 정착하고 프리스트레스를 가하여 원지반의 전단강도를 증대시키는 공법이다. 압축토(PEM) 옹벽의 경우, 일반 보강토 옹벽의 bottom-up 방식과 달리 단계별 top-down 방식으로 시공되며, 일반옹벽에 비해 절토량과 뒤채움량이 적어 부지이용율을 극대화시킬 수 있다는 장점이 있으며, 소단부에 식생이 가능한 친환경적인 공법이다.

따라서 본 연구에서는 프리캐스트 콘크리트 판넬(P.C. panel)과 프리스트레스가 도입된 earth bolt로 시공된 압축토 옹벽의 현장 계측자료와 SMAP-2D 프로그램을 이용한 수치해석을 통하여 압축토 옹벽의 거동특성을 쏘일네일링 시스템과 비교·분석하였다. 또한 Slide (ver. 4.0) 프로그램을 이용한 수치해석을 통해서 압축토 옹벽의 안전성 증대효과 및 거동특성을 살펴보았다.

2. 압축토 응벽 공법

2.1 압축토 응벽 공법의 개요

압축토 응벽의 기본구조는 그림 1과 같은 긴장재(earth bolt), 프리캐스트 콘크리트 판넬(P.C. panel), 콘크리트 기초 블록, 지압판 겸용넛트(G.S.B. nut), 막음재 겸용 casing pipe, coupler, 간격재(spacer)로 구성되어 있다. 표준형 프리캐스트 콘크리트 판넬은 공장제작형으로 폭 1.5m, 높이 1.5m, 두께 30cm의 크기로 제작되며, 현장 조건에 따라서 표준형과 2 Hole형, 삼각형 형태 등이 있다.

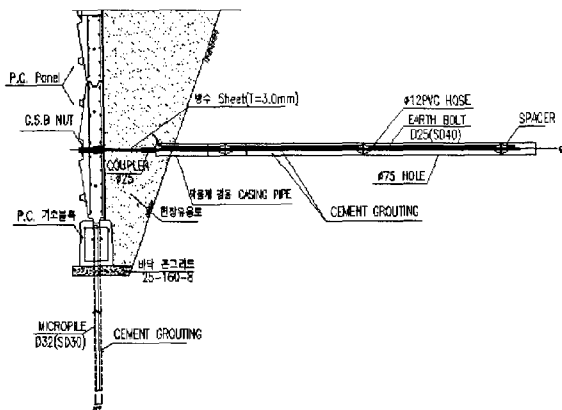


그림 1. 압축토(PEM) 응벽의 개요도

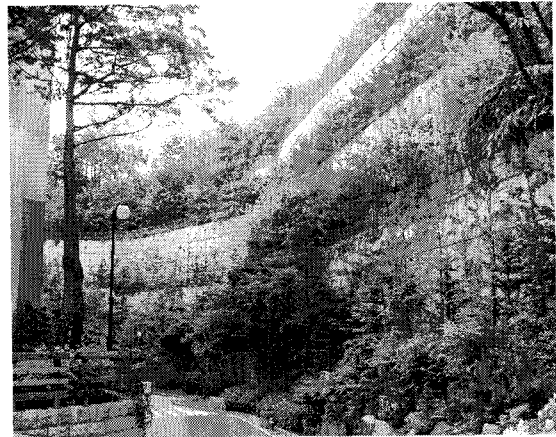


그림 2. 압축토(PEM) 응벽의 시공전경

압축토(PEM) 응벽은 단계별로 굴착하면서 프리캐스트 콘크리트 전면판을 시공하기 때문에 원지반의 이완을 최소화시키며, 절토사면을 보강하는 공법으로 터널 시공시 적용되는 록볼트와 같은 개념으로 볼 수 있다. 일반 응벽과는 달리 압축토 응벽은 단계별 top-down 공법으로 원지반 절취를 최소화시켜서 부지이용률을 극대화할 수 있으며, P.C. panel과 보강재의 프리스트레스 도입을 통해 원지반의 이완을 최소화하고, 뒤채움토와 보강지반이 압축블록토체로 형성되어 원지반 강도를 증진시켜 수평토압에 저항하게 된다. 또한, 암반사면의 경우 earth bolt의 system bolting과 grouting을 통하여 암반의 불연속면에 대한 봉합효과를 추가적으로 얻을 수 있다.

대부분의 절취사면이 반무한 사면으로 구성되어 있는 국내의 지형특성으로 인해 일반 L형, 역T형 응벽으로 시공시 많은 양의 절토량이 발생되어 공사비 및 공기측면에 어려움이 따를 수 있다. 따라서 국내 지형특성에 맞게 절취량의 상당부분을 억제할 수 있으며, 다단식 시공으로 소단부에 조경을 할 수 있는 친환경적인 공법이므로 일반 응벽에서의 위압감을 느끼지 않는다는 장점을 가지고 있다. 그림 2는 소단 조경이 이루어진 압축토 응벽의 시공전경을 나타내었다.

2.2 시공순서

압축토 응벽의 시공은 단계별로 사면절취를 하면서 미리 제작된 프리캐스트 콘크리트 판넬을 기초 블록 위에 수직으로 설치하고, 절취면과 판넬 사이에 뒤채움을 실시하는 조립 공정이므로 사면의 이완을 조기에 억제시켜 사면의 안정성을 증대시키는 특징이 있다. 또한, 일반 쏘일네일링 공법의 쏘크리트 타설과 달리 프리캐스트 판넬을 이용하여 전면벽체의 양생기간을 줄일 수 있어 시공기간을 단축시킬 수 있으며, earth bolt에 긴장력을 가하여 원지반의 강도를 증가시킬 수 있다는 이점이 있다. 압축토 응벽의 시공순서를 정리하면 그림 3과 같다.

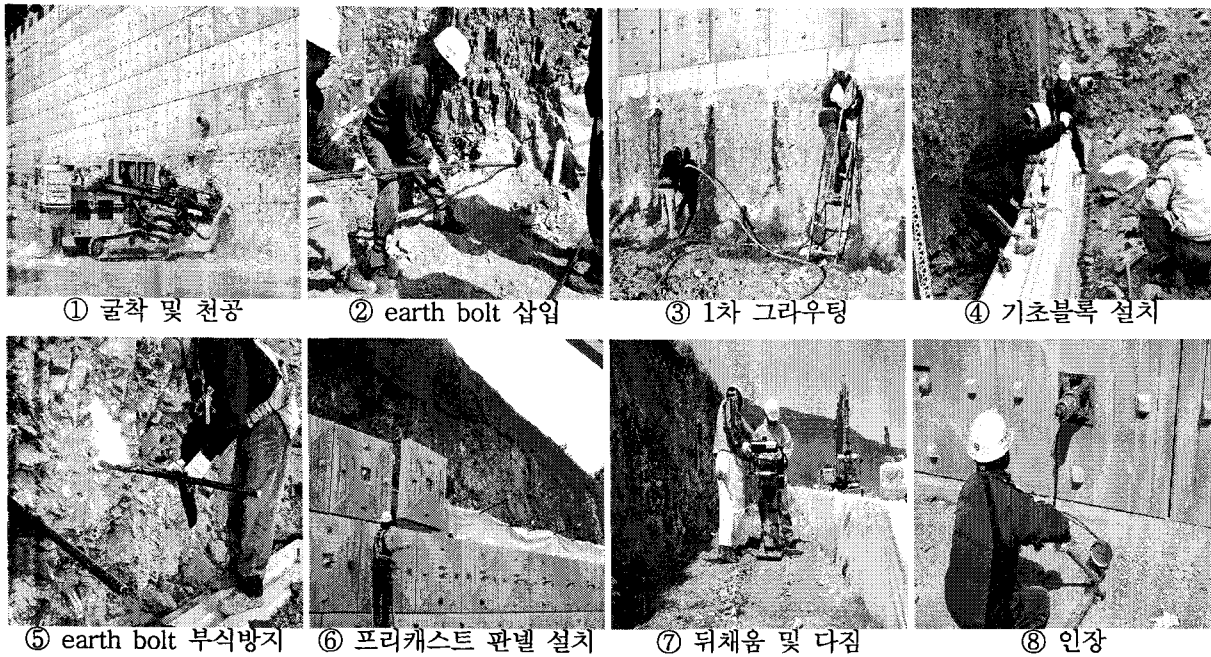


그림 3. 압축토(PEM) 옹벽 시공순서

2.3 압축토 옹벽 공법의 특징

2.3.1 프리스트레싱 Earth Bolt의 원리

압축토 옹벽은 앵커체와 같이 보강재(earth bolt)에 50~70kN 정도의 긴장력을 도입함으로써 압축토 옹벽의 안정성을 향상시킨다. 그림 4에 나타낸 바와 같이 보강재(earth bolt)에 프리스트레싱이 가해지면 두 가지 형태의 파괴양상이 나타난다. 첫째는 지반과 그라우트체 접촉면에서의 전단파괴가 일어나거나 earth bolt와 그라우트체 접촉면에서의 전단파괴가 일어나는 경우이다. 두 번째는 earth bolt 자체의 인장장도를 초과하는 인장력이 발생했을 때의 항복파괴이다.

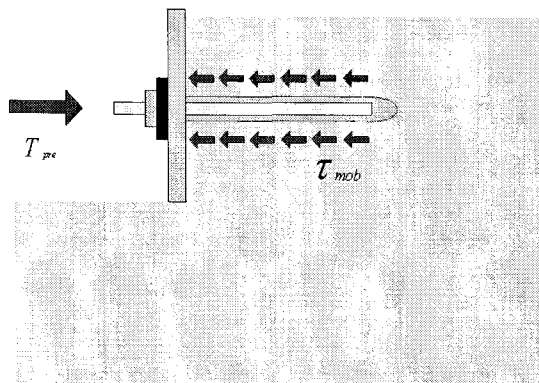


그림 4. 긴장력 작용시 발생하는 반력

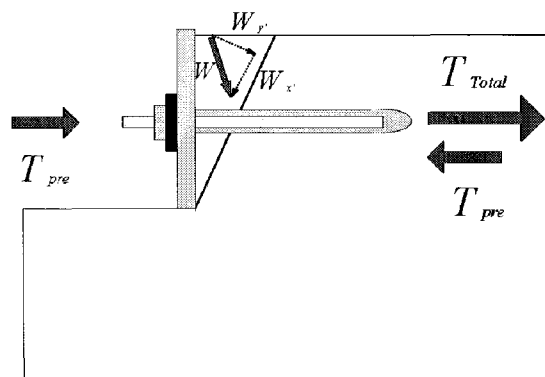


그림 5. 전체 안정성 평가 원리

그러나 전체 벽체의 안정성을 고려해 볼 때, 그림 5에 제시한 바와 같이, 프리캐스트 콘크리트 판넬에 가해지는 긴장력과 정착지반 및 earth bolt체에 발생하는 반력은 서로 같은 크기로 작용방향이 반대가 되어 발생하게 된다. 즉, 긴장력 도입에 의한 인발력 증가분과 같은 크기의 힘이 벽체에 작용하는 것이

다. 따라서 전체 안정성 고려시에는 earth bolt를 인발시키려는 힘과 벽체를 안정시키려는 두 힘의 효과가 상쇄되게 되는 것이다.

벽체에 연결된 earth bolt에 긴장력을 도입함으로써 벽체 배후 지반은 구속압 증가로 인해서 지반의 전단강도 특성이 향상되어 최종적으로 earth bolt의 인발저항력은 향상되게 된다. 또한 구속압의 증가로 인하여 더욱 큰 수직력을 저항할 수 있으며 예상 파괴면에서의 마찰효과를 증대시킨다. top-down 방식의 시공이 이루어지게 됨으로써 불가피하게 벽체 최상단의 변위가 발생하게 되는데, 이 또한 earth bolt체에 긴장력을 도입함으로써 감소시킬 수 있을 것으로 기대된다(이 등, 2005).

2.3.2 압축토옹벽(PEM) 시스템의 P.C. Panel 기대효과

프리캐스트 콘크리트 관널은 압축토 옹벽 시스템의 주요 구성 요소로서, earth bolt 시공시에 전면판 역할을 한다. 일반적으로 쏘일네일링 전면벽체에서 전단파괴의 주요인은 토체 내부에서 유발되는 전단력에 의한 일반전단파괴와 네일 내부에서 유발되는 인장력 전달에 의해 지압판이 전면벽체 내부로 관입하여 발생하게 되는 관입전단파괴가 있다. 특히 압축토 옹벽 시스템처럼 긴장력이 가해지는 경우에는 관입전단파괴에 대한 안정성 확보는 압축토 옹벽의 안정성에 중요한 요소가 된다. 그림 6에는 지압판 등 연결구조체에 대한 실내실험을 통해 관찰된 관입전단파괴면의 형태가 개략적으로 도시되어 있으며(FHWA, 1996), 전면벽체의 관입전단파괴 형태는 모서리가 없는 원뿔형태와 거의 유사하다.

또한, 권(2002)은 벽체강성이 증가할수록 토압경감효과가 증가하는 것을 확인하였다. 압축토 옹벽 시스템의 프리캐스트 콘크리트 관널은 철근 콘크리트부재로 일반 쏘일네일링 시스템의 슛크리트로 보강된 연성벽체보다 강성이 크므로 쏘일네일링의 연성벽체보다 수평토압 경감효과 및 관입전단파괴현상에 대해 유리할 것으로 판단된다. 그림 7에는 프리캐스트 콘크리트 관널의 평면도와 단면도를 도시하였다.

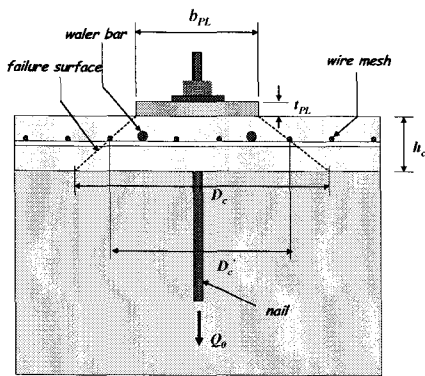


그림 6. 연결구조체에 대한 관입전단파괴의 개요

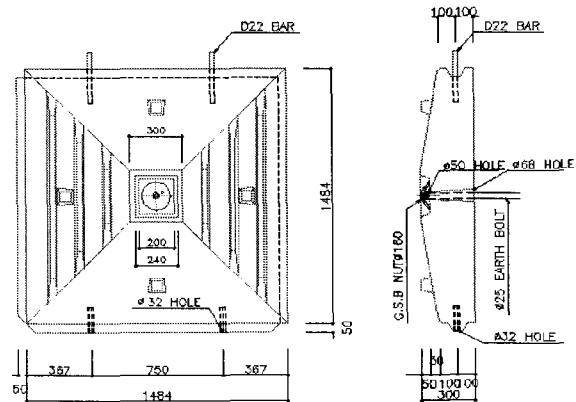


그림 7. P.C. panel 평면도 및 단면도

3. 현장계측 및 분석

본 연구에서의 현장계측은 서울시 종로구 ○○연립 조합아파트 신축공사 구간의 압축토 옹벽 신축공사현장으로 압축토 옹벽의 거동 특성을 판단하기 위해서 압축토 옹벽 배면지반의 심도별 변위측정이 가능한 지중경사계, 원지반의 지하수위를 확인할 수 있는 Casagrande Stand Pipe형 지하수위계를 설치하였다. 시공현장은 굴착심도 25.5m로 단계별 4단 굴착으로 시공되었으며, 보강재의 길이는 10m로 수직. 수평간격은 1.5m로 시공되었다. 그림 8은 계측기의 설치단면을 나타내었다.

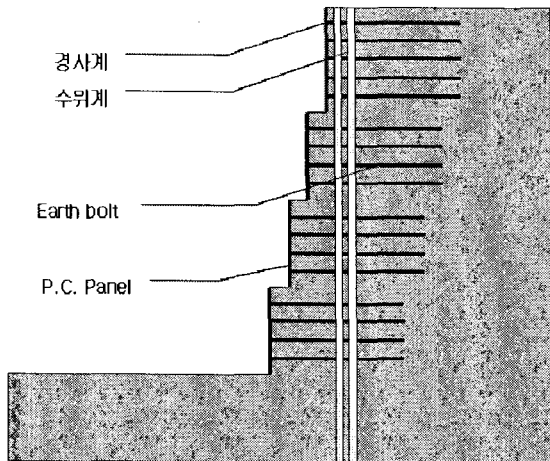


그림 8. 계측단면도

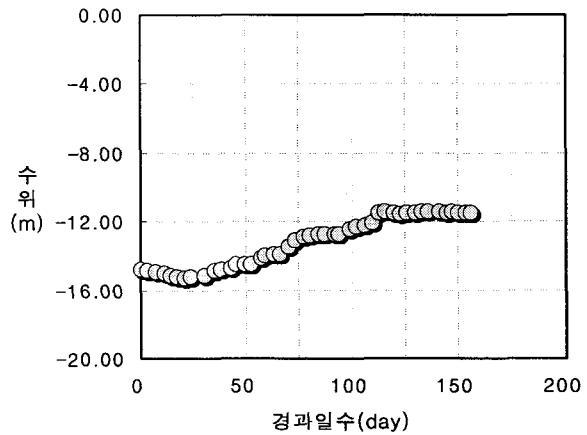


그림 9. 지하수위계 계측결과

지하수위 계측결과는 그림 9와 같이 시공완료 후 156일이 경과된 시점까지 계측한 결과를 나타내었으며, 그림 10은 압축토 옹벽 배면에 설치된 지중경사계 계측결과이다. 계측결과 일련의 굴착이 진행되는 동안 쏘일네일링 시스템과 동일하게 전면부의 수평·수직변위가 최대인 지점이 벽체상단이며(FHWA, 1991), 근소한 기울어짐이 발생하는 것으로 확인되었다. 소단을 이루며 굴착이 진행되는 동안, 각 소단(지반고를 중심으로 약 -8m, -14m, -20m, -25m)의 최상부에서 변위증가가 크게 발생하였다. 이것은 무지보 자립시 각 소단의 최상부에 발생하는 아칭현상에 의해서 횡방향 토압이 크게 발생했다고 판단된다. 굴착이 하부 소단부터 진행될수록 각 소단 최상부의 변위증가 폭이 작아지는 경향을 확인하였다.

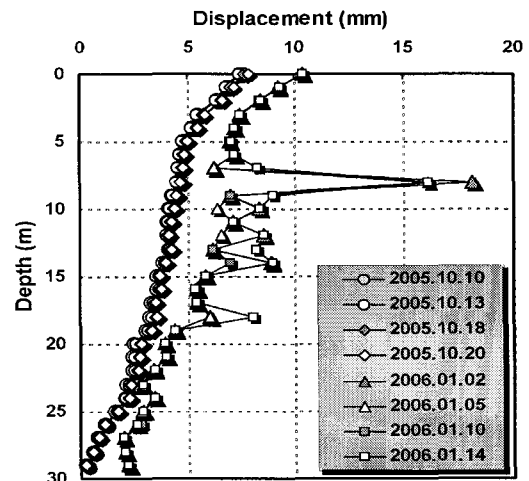


그림 10. 지중경사계 계측결과

4. 수치해석을 통한 시공사례 분석

4.1 SMAP-2D 프로그램 해석

4.1.1 개요

본 수치해석은 미국 COMTEC Research사에 의해 개발된 지반 및 구조물 유한요소해석 범용 프로그램인 SMAP-2D를 사용하여 당 현장 절취사면에 적용된 다단 압축토 옹벽의 시공중 안정성을 검토하였다. 그림 11 및 그림 12는 본 연구에서 적용된 대표단면과 격자요소망을 나타내었다. 수치해석을 위해 원지반의 경우 탄·소성 모델인 Mohr-Coulomb failure criterion을 적용하였으며, 절취사면에 사용되는 earth bolt는 케이블 요소(cable element), 전면판(P.C. panel)은 보 요소(beam element)로 모델링하였다.

표 1에는 수치해석에 적용된 지반의 물성치를 정리하였으며, 표 2에는 긴장력이 가해지는 earth bolt의 특성을 정리하였다.

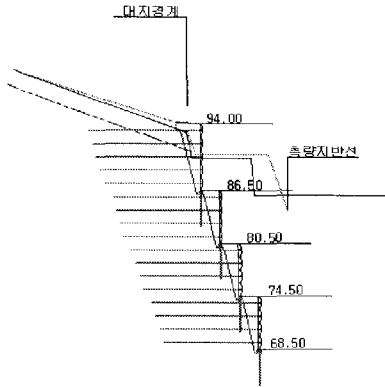


그림 11. 압축토(PEM) 옹벽 대표단면

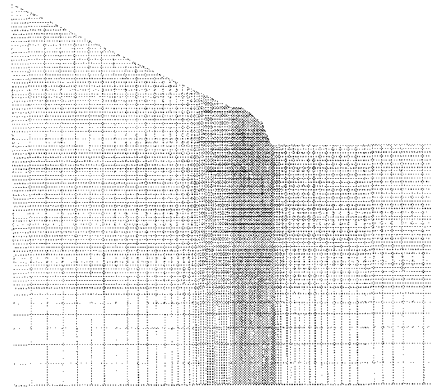


그림 12. 대표단면 해석 격자망

표 1. 분석에 적용된 지반 물성치

구 분	$\gamma(KN/m^3)$	$c(KPa)$	$\phi(^{\circ})$	$E(KPa)$	ν
풍 화 암	19.00	30.00	35.0	5.00×10^4	0.30
연 암	24.00	70.00	37.0	1.00×10^6	0.25
경 암	25.50	100.00	45.0	2.00×10^6	0.20
콘 크 리 트	25.50	5000.00	30.0	2.10×10^7	0.20
뒤채움 재료	19.00	30.00	35.0	1.00×10^5	0.30

표 2. 보강재의 특성

구 분	공칭단면적 (cm^2)	항복인장강도 (KPa)	탄성계수 (KPa)	수평·수직간격 (m)	비 고
Earth Bolt	5.067	4.00×10^5	2.10×10^8	1.5×1.5	SD 40

4.1.2 수치해석 결과

본 분석에서는 압축토 옹벽의 earth bolt 및 P.C. panel로 인한 거동특성을 분석하기 위해서 수치해석을 실시하였으며, 수치해석 결과로 얻어진 earth bolt의 축력변화 및 압축토 옹벽으로 보강된 절취사면의 전단력의 변화 양상을 그림 13 및 그림 14에 나타내었다.

그림 13의 결과를 살펴보면 배면 지반의 내부에 발생하는 전단응력은 P.C. panel을 지지하는 최하단 콘크리트 기초 블록에 인접한 원지반에서 최대 전단응력이 작용하는 것으로 나타났으며, 절취사면 하부 지표면으로부터 위쪽 6m 지점(1단 상부)에서 최하단부의 전단응력에 비해 37.8%의 전단응력이 나타나는 것으로 평가되었다. 그림 14의 결과를 살펴보면 earth bolt의 최대축력은 104kN(허용축력의 93%)이며, 각 소단 최하부에 설치된 earth bolt에서 가장 큰 축력값이 나타나는 것을 확인하였다. 따라서 다단 시공시 근접 시공에 따른 영향으로 기초 하단부에 위치한 원지반과 earth bolt에서 각각 최대 전단응력과 최대축력이 발생하는 것을 알 수 있다.

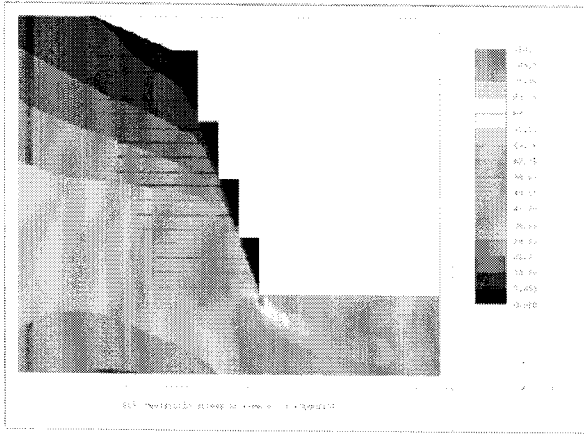


그림 13. 전단응력 분포도

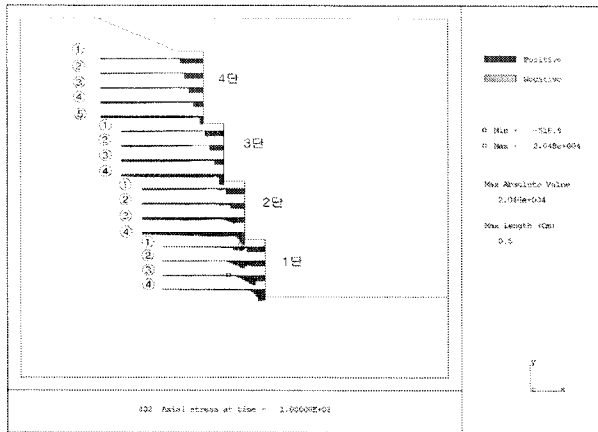


그림 14. earth bolt의 축력 분포도

4.2 Slide 프로그램 해석

한계평형해석 프로그램인 Slide(ver. 4.0) 프로그램을 이용하여 earth bolt의 긴장력 변화에 따른 압축토 옹벽의 거동특성을 분석하였고, 그림 15에 긴장력의 변화에 따른 안전율의 변화양상을 나타내었다.

그림 15의 결과를 살펴보면, 건기시와 우기시에 earth bolt에 가해지는 긴장력을 0~50kN까지 증가시키며 분석한 결과, 긴장력의 증가에 따라 건기시 최대 4.3%, 우기시 최대 4.1%씩의 안전율 증가현상이 관찰되었다. 이와 같은 결과는 프리스트레스를 가해줌에 따라서 earth bolt에서 발휘되는 주변마찰력이 증대되고, 전면벽체 내부로는 수동토압이 유발되어 원지반의 전체적인 전단강도가 증가했기 때문에 발생된 현상으로 판단된다. 또한 일반 쏘일네일링 시스템에 비해 굴착시 유발되는 수평변위 및 침하량이 일정부분 억제될 수 있을 것으로 판단된다.

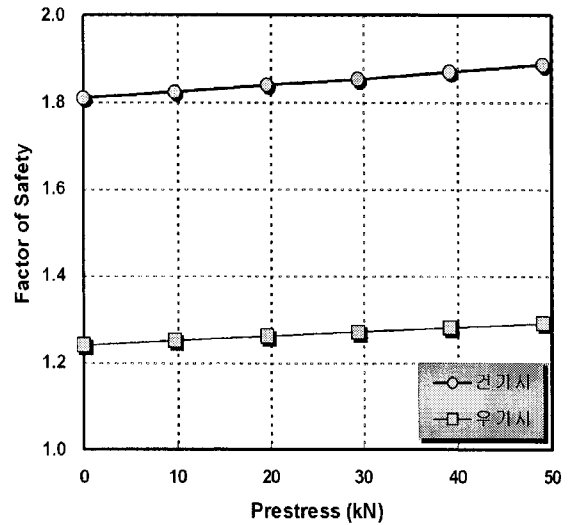


그림 15. 긴장력의 변화에 따른 안전율

5. 결론 및 제언

본 연구는 압축토(PEM) 옹벽 공법에 대한 현장 계측자료 및 수치해석 프로그램인 SMAP-2D 및 Slide(ver. 4.0)을 이용하여 프리캐스트 콘크리트 판넬과 earth bolt에 긴장력이 도입된 압축토 옹벽의 거동특성 및 안정성을 분석하였으며, 이상의 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 압축토(PEM) 옹벽 시스템의 주요소인 프리캐스트 콘크리트 판넬은 철근 콘크리트 구조물로 쏘일네일링 시스템의 쏘일네일링 벽체에 비해 강성이 크므로 수동토압의 경감효과 및 전단파괴에 대한 저항력이 클 것으로 기대된다.
- (2) 현장계측결과, 쏘일네일링 시스템과 유사하게 전면부의 벽체 최상단에서 최대 변위가 발생하였으나 일련의 굴착이 진행되는 동안 각 소단의 최상단부에서 변위증가가 발생하였다. 또한, 굴착심도가 깊어질수록 이러한 변위양상은 감소하는 것을 확인하였다.

- (3) 압축토(PEM) 옹벽에 작용하는 전단력은 P.C. panel을 지지하는 최하단 콘크리트 기초블럭에 인접한 원지반에서 최대전단력이 발생하며, 1단 상부(절취사면 하부 지표면 기준) 6m 지점까지 62.2%의 전단력이 감소하는 것으로 평가되었다.
- (4) earth bolt에 긴장력의 효과를 분석하기 위해서 긴장력을 0~50kN로 변화시켜가며 분석한 결과, 압축토(PEM) 옹벽의 안전율은 긴장력을 증가시킴에 따라서 건기시 최대 4.3%, 우기시 최대 4.1%의 안전율이 증가하는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 긴장력을 가해줌에 따라서 earth bolt에서 발휘되는 주면마찰력이 증대되고, 전면벽체 내부로는 구속압이 증가하여 원지반의 전체적인 전단강도가 증가했기 때문에 발생한 현상으로 판단된다.
- (5) 추후, 계측을 충실히 수행한 prototype test의 시험결과를 통하여 압축토 옹벽의 거동특성을 보다 구체적으로 확인할 필요가 있다고 판단된다.

참 고 문 헌

1. 권영호(2002), 전면벽체의 강성이 소일네일링 시스템의 안정성에 미치는 영향에 관한 연구, 홍익대학교 대학원 박사학위논문.
2. 이혁진, 안광국, 김홍택, 방운경(2005), 현장계측을 통한 프리텐션 쏘일네일링 시스템의 적용성 평가, 지반공학 공동 학술발표회 논문 및 초록집, pp.320-329.
3. FHWA(1991), French National Research Project Clouterre, *Recommandations Clouterre 1991* (English Translation) *Soil Nailing Recommendations*, Washington, D.C., FHWA-SA-93-026.
4. FHWA(1996), *Manual for Design and Construction and Monitoring of Soil Nail Walls*, Washington, D.C., Publication No. FWHA-SA-96_069.