

대형 Pull-out Test에 의한 보강토 지반의 변형특성에 관한 연구 A STUDY ON THE DEFORMATION OF REINFORCED EARTH USING LARGE SCALE PULL-OUT TEST

이은수, Eun-Soo Lee¹
이승호, Seung-Ho Lee²

- *1. E & S ENG 대표이사, Managing Director, E & S Engineering
- *2. 한양대학교 산업과학연구소 선임연구원, Researcher, Institute of Industrial Sciences, Hanyang Univ.

SYNOPSIS : Presently reinforced earth is widely utilized for earth structure increasingly not only domestic but also in many foreign countries because of its rapidity of construction and economic merits. The study on the reinforced earth has been actively carried out and enlarged in the theoretical aspect. But it has many problems to the application of the field.

In this study large scale Pull-out Test was used to analyze reinforced earth behavior considering deformation character of reinforced earth under the similar condition to the field.

1. 서론

프랑스 기술자 Henri Vidal이 1966년 보강토 공법 이론을 제시한 이래 각국의 대학, 연구소, 건설회사 등에서 여러형태의 실험과 수치해석 및 현장계측 등을 통하여 보강토이론은 많은 발전을 이룩해왔다. 또한 보강토 공법의 적용대상이 토목 구조물 전반에 걸쳐 확산됨으로써 건설기술자들로 부터 좋은 반응을 얻고 있다. 그러나 보강토 공법에 대한 연구가 이론적인 측면에서는 많은 발전을 가져 왔지만 실제 현장 적용에 있어서 많은 문제점이 도출되고 있는 것도 사실이다.

본 연구는 실제 현장상태와 유사한 조건하에서 보강토 지반의 변형 특성을 고찰하기 위하여 특수 제작된 대형 Pull-out Test기와 마찰타이(Friction Tie)를 이용하였으며 Hyperbolic 모델을 이용한 수치해석으로 뒷채움재와 보강재사이의 접촉부분(Interface)에 대한 물성치를 추정하여 분석하여 보았다.

2. 대형 Pull-out 시험

2.1 시험 장치

시험장치는 인발시험용 토조, 대형직접 전단상자, 인발장치, 컨트롤박스, 데이터 기록장치 등으로 구성되어 있다. 인발시험용 토조의 규격은 137cm×80cm×80cm (L×D×H)이고, 대형직접전단상자는 인발시험용 토조속에 설치할 수 있는 것으로 그 규격은, 120cm×60cm×70cm (L×D×H)이다. 그리고 이 시험기의 모든 조작은 Control Box에서 통제할 수 있도록 되어있으며, 또 이 시험기는 인발속도를 일정하게 유지할 수 있고, 인발장치에는 로드셀이 부착되어 있어 인발력을 측정할 수 있고, 인발속도를 일정하게 유지할 수 있다. 그리고 토조 안에는 토압계가 설치되어 내부의 토압을 측정할 수 있도록 되어있고, 보강재 자체에 변형을 측정하기 위해서 변위계를 부착할 수 있다. 로드셀, 변위계, 토압계 등에서 측정된 값은 데이터 기록장치에 저장된다. 상재압은 공기하중 장치에 의해 단계적으로 가해지게 된다(그림 2.1, 표 2.1 참조).

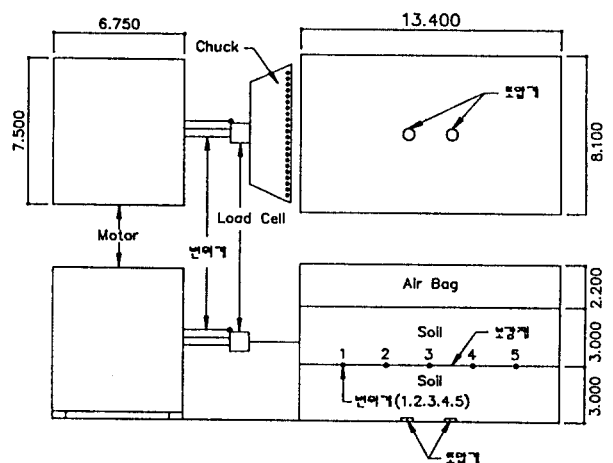


그림 2.1 대형 Pull-out machine 상세도

2.2 채움재(표준사)의 토질정수

시험에 사용된 채움재는 장기간 기건시킨 균등한 주문진 표준사를 사용하였고 (그림 2.2 참조) 비중은 2.70이며 최소 건조 단위 중량은 1.414 g/cm³이고 최대건조단위 중량은 1.624 g/cm³이다. 통일 분류법에 의하면 SP에 해당된다. 대형전단시험에 의한 채움재의 내부마찰각은 32° 정도로 나타났다(표 2.2 참조).

표 2.1 대형 Pull-out Test기의 제원

품 명	규 격	비 고
Pull - out box	137 × 81 × 81	1 SET
Shear box (상,하)	120 × 60 × 70	1 SET
Datalogger+Switch box		1 SET
Control box		1 SET
Load cell		1 EA
Displacement Transducer	500 mm	1 SET
"	100 mm	5 SET
Soil pressure gauge	20 kg/cm ²	2 SET
Air compressor		1 SET

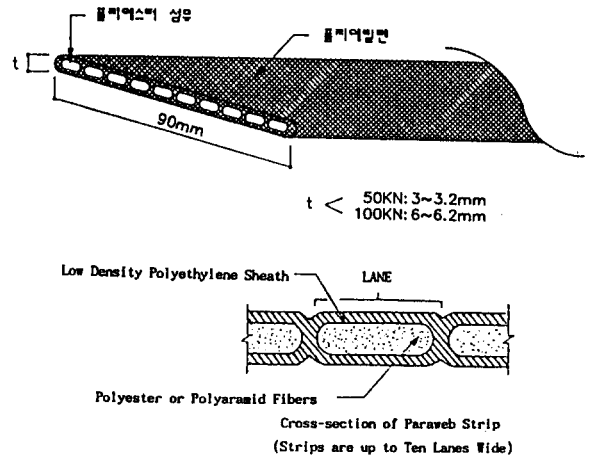


그림 2.3 시험에 사용된 보강재(Friction Tie)의 구조도

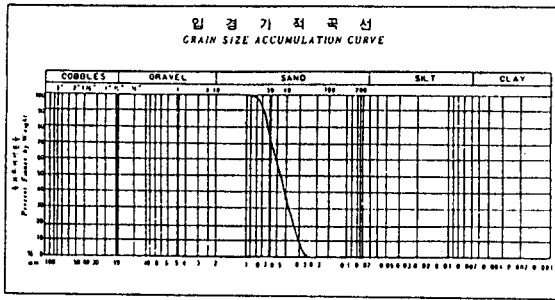


그림 2.2 채움재(표준사)의 입경가적곡선

표 2.2 채움재의 토질경수

비 중	$\gamma_d \text{ min}$ (g/cm ³)	$\gamma_d \text{ max}$ (g/cm ³)	ϕ (°)	통일 분류	비 고
2.70	1.414	1.624	32	SP	

2.3 보강재의 물성치

시험에 사용된 보강재는 국내에서 생산, 보편화된 마찰타이(Friction Tie)를 사용하였으며, 마찰타이의 강도는 내부의 폴리에스터 섬유에 강도로 결정되며, 외부의 폴리에틸렌은 마찰타이의 외형을 이루고 내부 섬유를 보호하는 역할을 한다. 그리고 마찰타이의 표면에 엠보싱 처리되어 있어 마찰력 유법을 크게 하였으며, 시험에 사용된 제품은 마찰타이는 신장력이 50 kN이며, 폭 $b = 90 \text{ mm}$, 두께 $t = 4 \text{ mm}$ 이다. (그림 2.3 참조)

2.4 시험방법

딛채움재(표준사)의 건조 단위 중량(γ_d)은 대형 Shear Box에 나하고를 일정하게 유지시키며 포설하는 낙사법을 이용하였으며 그 때의 값은 1.414 g/cm³이다. 인발시험은 최초에 토조하부로부터 30 cm 두께로 표준사를 낙사법에 의하여 포설하고 그 위에 보강재를 깔고, 다시 30 cm의 표준사를 포설한 다음 Air Bag을 설치하여 상재압을 가하였으며 인발속도는 분당 1 mm로 일정하게 유지 시켰다.

채움재의 내부마찰각(ϕ)을 측정하기 위한 대형 직접전단 시험은 전단상자에 60 cm의 두께로 모래를 낙사법에 의하여 채운후 Air Bag에 압력을 가하여 분당 1 mm의 속도로 전단 시켰다.

3. 시험결과 분석 및 고찰

마찰타이에 대한 인발력과 변형과의 관계를 구명하기 위하여 상재하중을 Air Bag을 이용하여 0.3, 0.4, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 kg/cm²의 6 단계로 구분하여 재하한 후 관찰해 보았다. 인발력의 증가형상은 최대 인발력 상태에 도달할 때까지 급한 기울기 형태를 보여주며 최대인발력을 정점으로 완만한 경사를 이루며 감소하는 경향을 나타낸다. (그림 3.1 참조)

상재하중을 전혀 가하지 않았을 경우에는 뚜렷한 최대인발력을 나타내지 않고 변위량만 증가하였는데 이는 흙과 보강재 사이의 마찰저항력이 작아서 보강재 자체가 저항없이 빠져버리기 때문으로 추측된다. 그러나 상재하중이 0.4kg/cm²일때 부터는 비교적 뚜렷한 최대인발력이 나타나며 그 최대인발력을 경계로 하여 감소하는 인발력의 기울기는 상재하중이 클수록 급하게 나타났다. 또한 상재하중의 크기에 따라 마찰저항력이 증가함을 알 수 있었다.

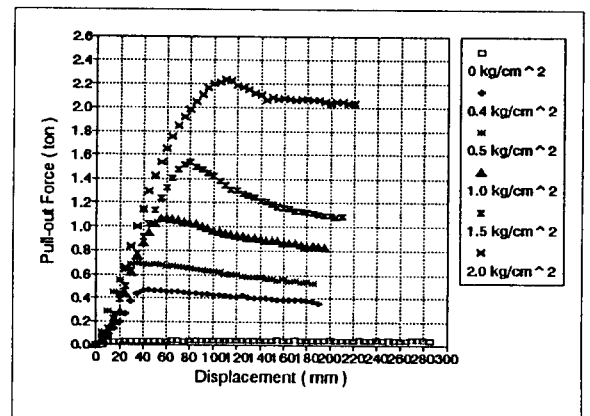


그림 3.1 마찰타이의 인발력 - 변형 관계도

실험결과 6 단계의 상재하중변화에 따른 최대인발력은 거의 직선적으로 증가하는 경향을 나타내었다.(그림 3.2 참조) 따라서 상재하중과 최대인발력은 비례관계를 갖고 있음을 알 수 있었다.

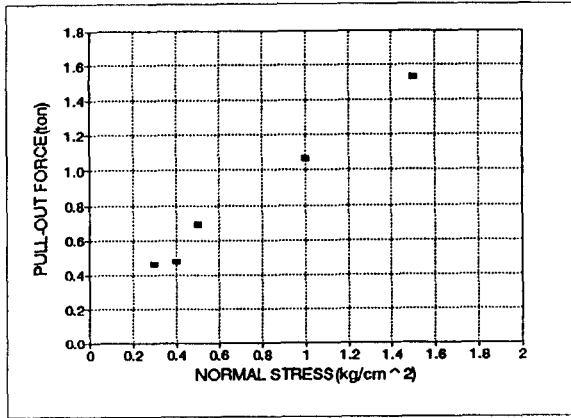


그림 3.2 수직하중 변화에 따른 최대 인발력 증가 관계도

보강재(마찰타이)의 부분적인 변위량을 관찰해보면 그림 3.3과 그림 3.4와 같으며, 작용인발력이 0.9ton일때 각 지점별 변위량을 비교해 보면 No. 3 지점과 No. 4 지점사이에서 최대변위가 발생하였으며 작용인발력이 1.0ton일 경우에는 No. 2 지점과 No. 3 지점사이에서 최대변위가 발생하였다. 이는 상재하중이 증가할 수록 최대변위의 발생지점이 보강재의 앞부분으로 이동한다는 것을 추측할 수가 있다.

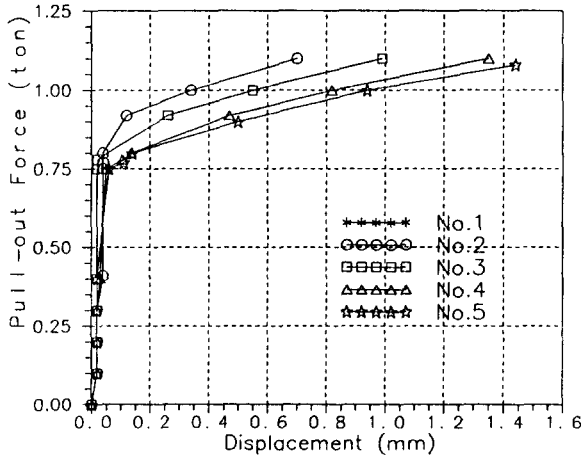


그림 3.3 보강재의 작용인발력과 각 지점별 변위량의 관계

4. 유한요소해석

본 연구에 사용된 Program은 Hyperbolic모델을 이용하여 흙의 비선형거동을 해석할 수 있으며 흙과 보강재 사이의 접촉부분을 Interface 요소를 이용하여 모델링 하였으며 보강재는 1차원 Bar 요소를 이용하였다. 또한 흙요소는 2차원의 사각형 요소로 모델링하였다. 인발장치를 모델링한 Mesh는 그림 4.1과 같으며 토체상부의 공기하중장치는 해석시 분포하중으로 작용시켰다.

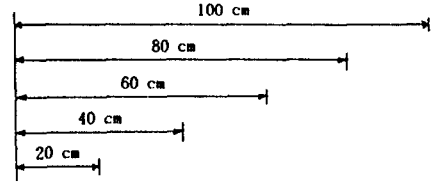
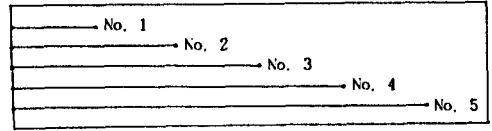


그림 3.4 보강재 각 지점의 측정위치

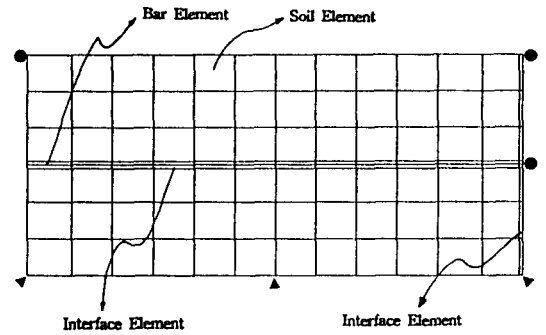


그림 4.1 인발장치를 모델링한 유한요소망

경계조건은 해석모델의 좌·우측부는 수평변위를 고정하고 수직변위만 발생하도록 하기 위하여 토올리로 하였으며, 이때 Pull-out Force가 작용하는 절점은 수평·수직변위를 고정하지 않았다. 해석모델의 하단부는 힌지로 하여 수평 및 수직변위를 고정하였다. 해석에 이용한 흙요소와 접촉요소의 물성치는 표 4.1 및 표 4.2와 같다. 유한요소망의 크기는 대형 Pull-out test의 크기와 동일하게 하였다.

표 4.1 해석에 이용한 흙요소의 물성치

c	ϕ	γ	K	K_{ur}	n	R_f	K_B	m
0.0 t/m ²	32°	1.414 t/m ³	300	300	0.4	0.7	100	0.2

여기서 c : 점착력 K_{ur} : 제하, 재재하시 변형계수정수
 ϕ : 내부마찰각 R_f : 파괴비
 K : 변형계수정수 K_B : 체적변형계수정수
 n : 변형계수지수 m : 체적변형계수지수
 γ : 채움재의 단위체적중량

표 4.2 역해석을 통하여 획득한 Interface 요소의 물성치

c	ϕ	K_n	K_s	K_{ur}	n	R_f
0.0 t/m ²	25°	10000	50.0	50.0	0.4	0.92

여기서, K_n : 수직스프링정수
 K_s : 전단스프링정수
 K_w : 제하, 제재하시의 스프링정수

Pull-out Test를 Simulation한 수치해석 결과 Pull-out Force와 변위와의 관계는 그림 4.2와 같으며 해석은 지반의 파괴가 발생할 때까지만 수행하였다.

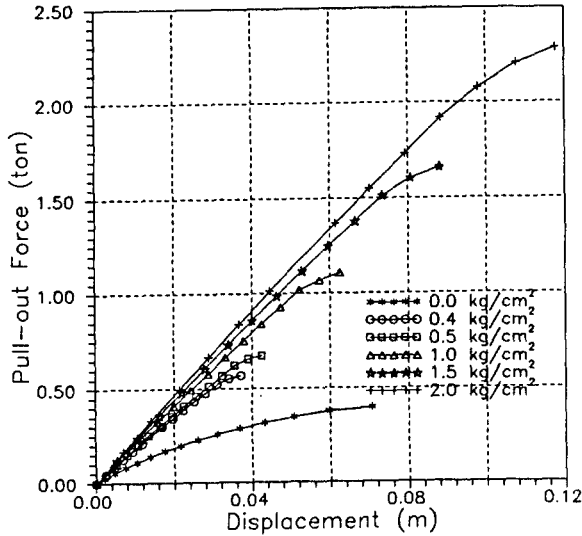


그림 4.2 대형인발시험을 Simulation한 수치해석 결과

수치해석결과 작용인발력과 변위량과의 관계가 대형인발시험결과와 대체로 비슷한 값을 나타내었다. 다만 상재하중이 작용하지 않을 경우에는 실험결과가 수치해석결과보다 작은 인발하중에서도 비교적 큰 변형이 발생하는 경향을 보여주었다.

실험결과와 마찬가지로 상재하중이 클수록 동일한 인발하중하에서 보강재의 변형이 적었으며 지반의 파괴강도는 점점 증가하는 것으로 나타났다.

5. 결론

대형인발시험장치를 이용하여 작용인발력과 변형과의 관계를 고찰하고 유한요소법을 이용하여 해석하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- (1) 시험장치는 대형인발시험장치이며 보강재는 마찰타이(Friction Tie), 채움재는 표준사를 사용하였다.
- (2) 낙사법에 의하여 채움재를 포설하였으며 인발속도는 1mm/min의 속도를 유지하였다. 대형전단시험에 의한 채움재(표준사)의 내부마찰각은 32° 정도로 나타났다.
- (3) 마찰타이에 대한 인발력과 변위와의 관계를 관찰하기 위하여 상재하중을 6단계로 나누어 제하하였으며 인발력의 증가형태는 최대인발력에 이를때까지 급한 경사를 이루며, 최대인발력을 정점으로 완만한 경사로 감소하는 경향을 나타냈다.
- (4) 상재하중의 증가에 따른 보강재의 최대인발력은 직선적(비례적)으로 증가하는 경향을 나타내었다.
- (5) 보강재의 부분적인 변위량을 관찰한 결과 상재하중이 증가할 수록 최대변위의 발생지점이 보강재의 앞부분으로 이동함을 알 수 있었다.

(6) 유한요소해석을 수행한 결과와 인발시험결과와는 비슷한 경향을 나타내었다.

REFERENCE

1. T.S. Ingold, 1982, "Reinforced Earth", Thomas Telford Ltd, London, pp.5.
2. Peterson, L.M., 1980, "Pullout Resistance of Welded Wire Mesh Embedded in Soil", M.Sc.Thesis, Utha State Univ.
3. Huang C.C. and Tatsuoka F., 1988, "Prediction of bearing capacity of level sandy ground reinforced with strip reinforcement". Proc. Int. Geotech. Symp. on Theory and Practice of Earth Reinforcement, Balkema, pp.191-196
4. Das, B.M., Moreno, R.M. and Dallo, K.F., 1985, "Ultimate Pullout Capacity of Shallow Vertical Anchors in Clay," Soils and Foundations, Vol.25, No.2, pp.148-152
5. Juran, I., Schlosser, F., Long, N.T. and Legeay, G., 1978, "Full Scale Experiment on a Reinforced Earth Bridge Abutment in Lille". Proc. ASCE Symp. Earth Reinforcement, Pittsburg, pp.556-584.
6. Smith, A.K.C. and Wroth, C.P., 1978, "The Failure of Model Reinforced Earth Walls". Proc. ASCE Symp. Earth Reinforcement, Pittsburg, pp.794-855.
7. Leshchinsky, D. and A.J. Reinschmidt "Stability of Membrane Reinforced Slopes", Journal of the Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.111, No.11, Nov., 1985.
8. T.S. Ingold, 1981, "Reinforced Earth Theory and Design," The Highway Engineer, pp. 2~14.